

2019

Determinación de los Requerimientos para la Transformación de un Generador de Impulso de Tensión en un Generador de Impulso de Corriente

Jhoan Sebastian Melo Trochez

**Escuela de Ingeniería Eléctrica y
Electrónica**

**Laboratorio de Alta Tensión de la
Universidad del Valle**



DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS PARA LA TRANSFORMACIÓN
DE UN GENERADOR DE IMPULSO DE TENSIÓN EN UN GENERADOR DE
IMPULSO DE CORRIENTE

JHOAN SEBASTIAN MELO TROCHEZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PREGRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2019

DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS PARA LA TRANSFORMACIÓN
DE UN GENERADOR DE IMPULSO DE TENSIÓN EN UN GENERADOR DE
IMPULSO DE CORRIENTE

JHOAN SEBASTIAN MELO TROCHEZ

Trabajo de Grado Pregrado en Ingeniería
Énfasis en Ingeniería Eléctrica

Director
Ferley Castro Aranda
Profesor, Ingeniero Electricista, Ph.D

Director
Andres Felipe Silva Imbachi
Ingeniero Electricista

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PREGRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2019

Dedicatoria

*A mis abuelos Alcides y Rubiela, por su infinito apoyo y ánimo a perseguir mis
sueños durante el tiempo que estuvieron a mi lado.*

*A mis abuelos Rafael y María, por siempre estar ahí cuando más los necesité,
velando por que todo esté bien.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mi familia por ser responsables de mi crecimiento como persona y estudiante, garantizando que me convierta en el profesional que ellos siempre desearon y lucharon por que fuera. A mis padres que dedicaron su vida para brindarme la mejor educación, a mis tíos por su apoyo total en todos los aspectos de mi formación, y a mis abuelos por convertirse en un ejemplo a seguir.

Un agradecimiento al ingeniero Ferley Castro Aranda Ph.D, director del Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle y director de este trabajo de grado, por el apoyo brindado para la resolución de este proyecto, y orientarme siempre en la dirección correcta.

Agradecer al ingeniero Andres Felipe Silva I. también director de este trabajo de grado, por siempre estar disponible para ser un guía en este proyecto, y su dedicación para garantizar que todo el trabajo se encuentre de la mejor manera posible.

A la Universidad del Valle y a todos los docentes de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica por proveerme con una formación académica de nivel superior.

Finalmente, un agradecimiento especial a todos mis compañeros y amigos de carrera, quienes formamos una gran familia durante este trayecto, y como tal, me apoyaron en todo lo que necesitaba y velaron porque este proyecto finalizara satisfactoriamente.

CONTENIDO

pág.

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO UNO.....	3
1. EL GENERADOR DE IMPULSO DE VOLTAJE.....	4
1.1 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO	4
1.2 OBJETIVO GENERAL	4
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
1.4 CONCEPTOS GENERALES	5
1.4.1 Generador tipo Marx de una etapa.	7
1.4.2 Generador tipo Marx de múltiples etapas.	8
1.4.3 Fase de carga del Generador Marx.	9
1.4.4 Fase de descarga del Generador Marx.	10
1.4.5 Energía entregada por el generador multietapas.....	11
1.4.6 Eficiencia del generador de impulso de tensión tipo Marx.	11
1.5 EL GENERADOR DE IMPULSOS DE TENSIÓN DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE	12
1.5.1 Especificaciones técnicas del GIV.	13
1.6 SIMULACIÓN DEL GENERADOR DE IMPULSOS DE TENSIÓN DEL LAT EN EL SOFTWARE ORCAD PSPICE	14
1.6.1 Resultados obtenidos en la simulación.	15
CAPITULO DOS.....	19
2. EL GENERADOR DE IMPULSO DE CORRIENTE (GIC).....	20
2.1 CONCEPTOS GENERALES	20
2.2 ANÁLISIS CIRCUITAL DEL GENERADOR DE IMPULSOS DE CORRIENTE	24

2.3	DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS DEL CIRCUITO DEL GIC	29
2.4	SISTEMAS DE MEDICIÓN PARA IMPULSOS DE CORRIENTE	31
2.4.1	Dispositivo Convertidor.	32
2.4.1	Conductores.....	34
2.4.2	Cable de Medida.	34
2.4.3	Registrador de Señales.....	34
2.5	SIMULACIÓN DEL GIC EN EL SOFTWARE ORCAD PSPICE	35

CAPITULO TRES..... 41

3. EL DISPOSITIVO DE PROTECCION CONTRA SOBRETENSIONES (DPS) 44

3.1	FUNCIONAMIENTO DEL DPS	45
3.1.1	Parámetros de funcionamiento del DPS.	46
3.2	NORMATIVIDAD VIGENTE DE LOS DPS	47
3.2.1	Ensayos de Tensión Residual.....	47
3.2.1.1	Ensayo de tensión residual de impulso tipo rayo.	48
3.2.2	Ensayo para verificar la rata de transferencia de carga repetitiva Q _{rs}	48
3.3	MODELO CIRCUITAL PARA TRANSITORIOS RÁPIDOS	50
3.3.1	Modelo de DPS de la IEEE.	51
3.4	SIMULACIÓN EN EL SOFTWARE ATP DEL MODELO DE DPS	53
3.4.1	Cálculo de Parámetros Lineales del Modelo.	55
3.4.2	Obtención de la Característica No Lineal (V-I) del Modelo.	56
3.4.3	Implementación del Modelo en ATP.	56

CAPITULO CUATRO.....59

4. REQUERIMIENTOS PARA LA TRANSFORMACIÓN DEL GIV DEL LAT, EN UN GIC 61

4.1	CONFIGURACIÓN DEL GIC A IMPLEMENTAR	61
4.1.1	Punto de Partida para Determinar el Circuito del GIC.	61

4.1.2	Circuito para el GIC a implementar sobre el GIV del LAT.....	62
4.1.2.1	Resistencias del circuito a implementar.....	64
4.1.2.2	Explosores del circuito a implementar.	64
4.1.2.3	Fuente de alimentación del circuito a implementar.	64
4.1.2.4	Conexión a tierra del circuito a implementar.....	64
4.1.2.5	Salida hacia objeto de prueba.....	65
4.1.3	Circuitos de Carga y Descarga.	65
4.1.4	Modificaciones físicas necesarias para la transformación del GIV al GIC.	66
4.1.4.1	Punto común de resistencias.	67
4.1.4.1	Punto común de capacitancias.	67
4.1.4.2	Fuente de alimentación y resistencia R_{si} a tierra.	68
4.1.4.3	Bobina y resistencia externa.....	69
4.2	ESPECIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS A OBTENER PARA CONCRETAR LA TRANSFORMACIÓN DEL GIV AL GIC.....	70
4.2.1	Bobina o Inductor L del Circuito Generador.	70
4.2.2	Resistencia Externa R_{ext} del Circuito Generador.	72
4.2.3	Bobina de Rogowski para medición del impulso.....	73
4.3	METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DEL IMPULSO DE CORRIENTE ESTÁNDAR EN EL GIC A IMPLEMENTAR.....	73
4.3.1	Ejemplo de Obtención de Impulso Estándar.....	74
4.4	LIMITES OPERATIVOS DEL GIC A IMPLEMENTAR	78

5. CONCLUSIONES..... 80

BIBLIOGRAFÍA.....82

ANEXOS.....84

Anexo A.1 Elementos del generador de impulsos de voltaje del LAT de la Universidad de Valle mencionados en el trabajo de grado.84

Anexo B.1 Tablas de valores típicos de tensiones residuales máximas en DPS de entre 1.5 kA y 10 kA.86

Anexo C.1 Tablas de especificaciones de los componentes del GIC a implementar. 87

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Límites para el parámetro de tiempo T_1 / T_2 de las ondas de impulso de corriente.	27
Tabla 2. Relaciones entre componentes RLC para onda 8/20 μ s.	30
Tabla 3. Ejemplos de determinación de parámetros para distintas capacitancias y tensiones de entrada.	31
Tabla 4. Resultados obtenidos para el circuito de la Figura 21.	35
Tabla 5. Límites para los valores de resistencia R	37
Tabla 6. Resultados obtenidos para el circuito de la Figura 23.	38
Tabla 7. Resultados obtenidos para el circuito del segundo ejemplo de la Tabla 3.	40
Tabla 8. Comparación de resultados obtenidos en las ondas de la Figura 23 y Figura 26.	41
Tabla 9. Resumen de resultados de simulaciones realizadas.	42
Tabla 10. Valores nominales de la rata de transferencia de carga repetitiva Q_{rs}	49
Tabla 11. Procedimiento a efectuar en la prueba de carga repetitiva Q_{rs}	49
Tabla 12. Característica V-I para A_0 y A_1 en Figura 30.	51
Tabla 13. Cálculo de los parámetros lineales del modelo de DPS de la IEEE.	52
Tabla 14. Información de fábrica del Descargador PEXLIM P96 de ABB	54
Tabla 15. Cálculo de parámetros lineales del modelo a implementar.	55
Tabla 16. Característica tensión corriente (V-I) para A_0 y A_1 para el DPS en cuestión.	56
Tabla 17. Resultado de tensión residual obtenido en el modelo de DPS simulado.	58
Tabla 18. Resultados de tensiones residuales a distintos picos de corriente aplicados.	59
Tabla 19. Resultados de onda obtenida en condición de corto circuito.	75
Tabla 20. Resultados de las ondas obtenidas al conectar el DPS, al corregir con variación de R y L, y al aumentar la tensión de entrada.	77

Tabla 21. Descripción de los límites de operación del GIC a implementar en el LAT.....	79
--	----

Tabla A.1.1. Descripción de elementos disponibles en el GIV del LAT de la Universidad del Valle	84
---	----

Tabla A.1.2. Especificaciones técnicas del GIV del LAT.....	85
---	----

Tabla B.1.1. Tensiones residuales para descargadores de sobretensiones de 20 000 A y 10 000 A. Valores presentados a la tensión nominal.....	86
--	----

Tabla B.1.2. Tensiones residuales para descargadores de sobretensiones de 5 000 A, 2 500 A y 1 500 A. Valores presentados a la tensión nominal.....	86
---	----

Tabla C.1.1. Magnitudes disponibles de R y C equivalentes para el GIC.....	87
--	----

Tabla C.1.2. Dimensiones del Inductor elaborado en el ejemplo de la Figura 50..	87
---	----

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Onda de un impulso de tensión estándar.....	6
Figura 2. Circuito Marx de una etapa.	7
Figura 3. Circuito de un generador Marx multietapa (3 etapas).	8
Figura 4. Fase de carga del generador Marx multietapa.	9
Figura 5. Fase de descarga del generador Marx multietapa.	10
Figura 6. Generador de Impulsos de Tensión del LAT de la Universidad del Valle.....	13
Figura 7. Circuito esquemático de 4 etapas del GIV del LAT.	14
Figura 8. Esquema de 4 etapas del GIV del LAT en el software OrCAD PSpice.	15
Figura 9. Onda obtenida mediante la simulación del circuito de 4 etapas del GIV.	16
Figura 10. Pico de tensión obtenido en la simulación.	16
Figura 11. Tiempos del 90% y 30% en la onda obtenida.	17
Figura 12. Tiempo de cola obtenido en la onda resultado de la simulación	18
Figura 13. Onda de impulso de corriente estándar.	21
Figura 14. Ejemplo de un Generador de impulsos de corriente.	22
Figura 15. Circuito generador de impulsos de corriente detallado.	23
Figura 16. Circuito elemental de un generador de impulsos de corriente.	24
Figura 17. Diferentes condiciones de descarga en un GIC.	25
Figura 18. Tipos de resistencias shunt tubulares para medición de impulsos de corriente.	33
Figura 19. Esquema de bobina de Rogowski con integrador.	33
Figura 20. A) Ejemplo real de bobina de Rogowski. B) Integrador.....	34
Figura 21. Esquema básico de circuito un GIC simulado en el software OrCAD PSpice.	35
Figura 22. Onda de impulso de corriente obtenida al simular el circuito	
Figura 21	36
Figura 23. Esquema básico de circuito del GIC con R modificado.....	37
Figura 24. Ondas de impulso de corriente obtenidas para distintos valores de R	38

Figura 25. Ondas de corriente obtenidas para el segundo ejemplo de la Tabla 3.	39
Figura 26. Onda de impulso de corriente obtenida para el último ejemplo de la Tabla 3.....	41
Figura 27. Estructura típica de un DPS de óxido de metal.	44
Figura 28. Característica V-I típica de DPS tipo MO.	45
Figura 29. Modelo de DPS adoptado por la IEEE	51
Figura 30. Característica V-I para las resistencias no lineales A_0 y A_1	52
Figura 31. Parámetros calculados a integrar al modelo del DPS.	55
Figura 32. Modelo del DPS implementado en el software ATP.....	57
Figura 33. Parámetros de entrada del modelo del DPS, bloque ZNO92_IEEE.....	57
Figura 34. Onda de corriente tipo rayo 8/20 μ s que se aplicará al modelo del DPS.	58
Figura 35. Tensión residual y Corriente de impulso en bornes del DPS simulado.....	58
Figura 36. Tensiones residuales en bornes del DPS al aplicar ondas de impulso corriente de distintos valores pico.....	59
Figura 37. Acoplamiento en paralelo del GIV del LAT.....	61
Figura 38. Conexión propuesta para el circuito del GIC, editado sobre la Figura 37.	62
Figura 39. Circuito elemental del GIC a implementar sobre el GIV existente.....	63
Figura 40. Fase de carga del circuito GIC a implementar.	65
Figura 41. Fase de descarga del GIC a implementar.....	66
Figura 42. Conexión a realizar de punto común de resistencias con herraje.	67
Figura 43. Configuración actual de resistencias paralelo R_{pi} del GIV.....	67
Figura 44. Configuración actual de capacitores del GIV.	68
Figura 45. Conexión a realizar de punto común de capacitores con herraje.	68
Figura 46. Configuración actual de entrada de alimentación del GIV.....	69
Figura 47. Nueva entrada de fuente de alimentación y resistencias a retirar.....	69
Figura 48. Esquema de conexión de objeto de prueba propuesto.	70
Figura 49. Nodo de llegada del Explosor del GIV.....	70

Figura 50. Ejemplo de Inductor variable de núcleo de aire; (a) Modelo esquemático. (b) Inductor físico construido. (c) Resultados de respuesta a la frecuencia del inductor.	71
Figura 51. Resistencias variables de alta potencia 10W~10kW	72
Figura 52. Bobinas de Rogowski comerciales tipo flexibles, incluye integrador, 50 kA.	73
Figura 53. Impulso de corriente obtenido en corto circuito. (a) Circuito GIC representativo a la realidad simulado en PSpice. (b). Onda de corriente 8/20 μ s obtenida.....	75
Figura 54. Onda alterada obtenida al conectar el objeto bajo prueba	76
Figura 55. Onda corregida mediante la modificación de parámetros R y L.	77
Figura 56. Onda corregida con aumento de tensión de entrada al sistema.	77

RESUMEN

El presente trabajo de grado presenta el estudio de la determinación de los requerimientos necesarios para transformar el Generador de Impulso de Voltaje de 1100 kV presente en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle en un Generador de Impulsos de Corriente que amplíe la oferta de servicios del Laboratorio para realizar pruebas en Dispositivos de Protección contra Sobretensiones o Pararrayos. Para dar cumplimiento al objetivo se plantea una metodología que consiste en la apropiación con el GIV actual mediante estudio y simulación del mismo, y de igual forma con la teoría de funcionamiento del GIC. Se realiza un estudio del modelo circuital de los DPS y de la normatividad que rige la realización de pruebas en el mismo para definir el nivel de practicidad del Generador a implementar, y con estos temas abordados se procede finalmente a determinar los requisitos para transformar el GIV presente en un GIC incluyendo información sobre elementos necesarios que ya se posean y elementos por obtener para formar el circuito de generación de la onda estándar necesaria para llevar a cabo las pruebas mencionadas en los DPS.

Palabras Claves: Transformación, Generador de Impulso de Voltaje, Generador de impulso de corriente, Requerimientos, Dispositivo de protección contra sobretensiones, Pararrayos, Determinación.

ABSTRACT

This document presents the study of the requirements determination in order to transform the 1100 kV Impulse Voltage Generator (GIV) found at the High Voltage Laboratory (LAT) of the University of Valle, into an Impulse Current Generator (GIC) capable of expanding the Laboratory service offer, so tests on surge arresters become available. In order to achieve the main objective, a method is presented where an appropriation with the GIV is developed through a deep study and software simulations, and likewise, the same procedure is developed with the operating theory of the GIC. A DPS circuit model study is carried out along with a DPS test regulations review so a level of convenience of the expected GIC is defined. Having reviewed the previous subjects, the determination of the requirements needed to transform the GIV into a GIC is carried out, including information about already owned elements that may be required, and new elements that may be obtained in order to accomplish the standard current waveshape generating circuit, so the previously mentioned DPS tests can be performed.

Key Words: Transformation, Impulse Voltage Generator, Impulse Current Generator, Requirements, Surge Arrester, Surge Protection Device, Determination.

INTRODUCCIÓN

Las fallas en los sistemas de potencia a causa de descargas atmosféricas y sus extremadamente elevados niveles de tensión y corriente generaron la necesidad de proteger los elementos expuestos a dicho fenómeno, por lo que se mejoró su aislamiento interno y se crearon dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS) que actuaran como camino alternativo para descargar las sobretensiones a tierra y evitar que siquiera entren en contacto con los componentes del sistema eléctrico o electrónico al que impacten. Sin embargo, la capacidad del aislamiento de los componentes o el correcto funcionamiento de los DPS al estar expuestos a impulsos tipo rayo deben ser probados primero en un ambiente controlado como lo es un laboratorio de alta tensión para garantizar su desempeño una vez en campo. En el laboratorio de alta tensión (LAT) de la Universidad de Valle es posible conocer el comportamiento de los elementos instalados en el sistema de potencia al exponerlos a una descarga atmosférica de tensión tipo rayo, esto gracias a la existencia del Generador de Impulsos de Voltaje (GIV) Marx serie E, de 1.1 MV con 11 etapas, el cual está compuesto básicamente por un arreglo de resistencias y capacitores que, según sus valores, definen los tiempos de frente y cola de la onda de impulso a obtener mediante la carga y descarga de los capacitores a través de las resistencias. Dichos tiempos deben cumplir con unos parámetros determinados para considerarla como una onda de tensión tipo rayo, y para ello se deben respetar unas tolerancias que garanticen su comportamiento estándar.

No obstante, impulsos de tensión de exorbitantes magnitudes no son los únicos presentes en los sistemas de potencia cuando son impactados por descargas atmosféricas, pues **impulsos de corriente** con gran potencial destructivo son inyectados de igual manera en los circuitos durante este fenómeno, y los componentes expuestos deben ser capaces de soportar también el nivel de corriente que la descarga posee de manera eficaz. Por consiguiente, un Generador de Impulsos de Corriente (GIC) resulta necesario para generar impulsos de corriente artificiales en el laboratorio y así probar la capacidad de los elementos y protecciones del sistema contra el impacto de las descargas atmosféricas,

Debido a la importancia en seguridad de los DPS en los sistemas de potencia, estos deben ser probados en profundidad contra impulsos de tensión y corriente previo a su labor en campo.

El LAT de la Universidad del Valle carece actualmente de un GIC para realizar pruebas que requieran impulsos de corriente, y resulta conveniente poseer uno pues ampliaría la oferta de servicios del laboratorio estando a la vanguardia en el ámbito de pruebas en alta tensión. Sin embargo, la adquisición de dicho generador resulta costosa e ineficiente, por lo cual existe un procedimiento en el que es posible transformar un GIV en un GIC aprovechando la similitud de ambos circuitos elementales, necesitando de pocos cambios o elementos adicionales.

Este procedimiento resulta ser entonces la mejor opción en la búsqueda de obtener un GIC en el LAT de la Universidad del Valle y en este proyecto de grado se estudian los requerimientos necesarios para llevar a cabo la transformación mencionada a través de los siguientes capítulos.

En el Capítulo 1 se describe la justificación y objetivos del presente trabajo de grado, además se exponen los conceptos generales para la creación de ondas de impulso de tensión a través del GIV, y se estudia el funcionamiento del generador estructurado en el LAT de la Universidad del Valle, en conjunto con la simulación del mismo.

En el Capítulo 2 se presenta la teoría de funcionamiento de los GIC y la normatividad que rige la creación de ondas de impulso de corriente a través de dichos generadores, además de múltiples simulaciones computacionales que ayudan a la apropiación del tema.

En el Capítulo 3 se aborda el funcionamiento de los DPS junto con el modelo circuital que lo representa, la normatividad de las pruebas que se le realizan que requieren el uso de un GIC, y la demostración de su operación mediante simulación computacional.

En el Capítulo 4 se presenta la fusión de los conceptos aprendidos en los capítulos anteriores al describir los requerimientos para la transformación del GIV del LAT de la Universidad del Valle en un GIC capaz de realizar pruebas en DPS.

CAPÍTULO UNO

“Un hombre puede imaginar cosas que son falsas, pero sólo puede entender cosas que son verdad” **Isaac Newton.**

Las descargas atmosféricas, fenómeno natural maravilloso para el ser humano, son responsables de una gran cantidad de fallas eléctricas por el impacto destructivo que generan al entrar en contacto con los componentes de las líneas de transmisión o subestaciones. Resulta pertinente entonces reproducir artificialmente la forma y magnitud del impulso de tensión tipo rayo para así probar previamente aquellos elementos que se verán expuestos a descargas atmosféricas en su funcionamiento, y esto se logra con un generador de impulsos de voltaje (GIV).

En el siguiente capítulo se estudiarán los conceptos generales para su creación y funcionamiento, así como se expondrán las características del GIV estructurado en el LAT de la Universidad del Valle, junto con la simulación pertinente del mismo.

1. EL GENERADOR DE IMPULSO DE VOLTAJE

1.1 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

En el laboratorio de Alta tensión (LAT) de la Universidad del Valle se encuentra estructurado un generador de impulso de voltaje (GIV), pilar fundamental en los procesos de pruebas para determinar el comportamiento del aislamiento de los principales elementos utilizados en redes de distribución y transmisión, subestaciones, y demás zonas del sector eléctrico cuando estos se exponen al impacto de una sobretensión generada por una descarga eléctrica.

La investigación que se llevara a cabo en este trabajo de grado busca estudiar la manera de hacer uso de la característica modular del GIV, aprovechando el hecho que éste ya se encuentra montado en el LAT, y transformar dicho generador en un generador de impulsos de corriente (GIC) que supla la necesidad afrontada actualmente.

Con la determinación de los requerimientos necesarios para la transformación se buscará aumentar la posibilidad de ampliar la oferta de servicios del LAT al permitir la realización de estas pruebas que se solicitan y que actualmente no se pueden atender, buscando estar a la vanguardia en el ámbito de pruebas de alta tensión.

Finalmente, con esta investigación se busca lograr una mejoría en la confiabilidad de los equipos eléctricos que se instalan o fabrican en el país, generando un aporte al sector eléctrico nacional, y a la sociedad en general.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Determinar los requerimientos para la conversión del generador de impulsos de tensión del LAT de la Universidad del Valle en un generador de impulsos de corriente orientado a pruebas en dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS).

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar y especificar las características de los equipos necesarios para la transformación del GIV al GIC.
- Validar el funcionamiento teórico del GIC a implementar mediante simulación computacional.
- Definir los rangos operativos del GIC a implementar.

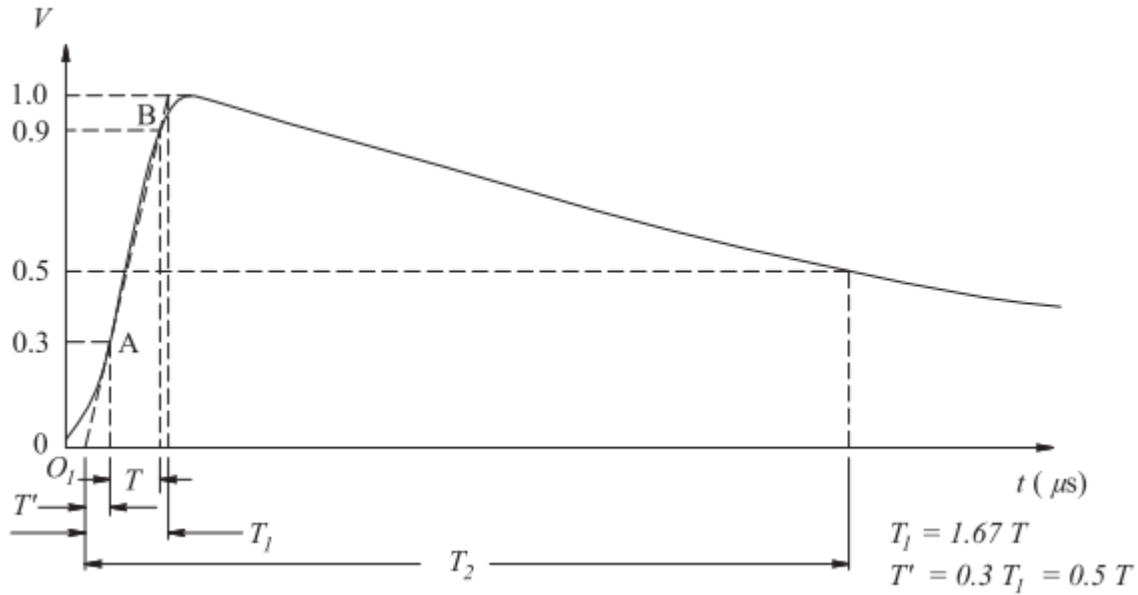
1.4 CONCEPTOS GENERALES

Cuando un rayo impacta directamente sobre los conductores de fase o sobre los hilos guarda de una red de transmisión, se originan ondas de tensión con amplitudes muy elevadas que se propagan a lo largo de estas líneas y que someten al material dieléctrico a dicha sobretensión. [1]

La necesidad por garantizar la resistencia a dichas sobretensiones de corta duración originadas por descargas atmosféricas en elementos como aisladores de alta tensión, usados en líneas o transformadores, generó un movimiento investigativo en la década del 30 sobre el impacto del rayo en las redes de alta tensión. Haciendo uso de las innumerables mediciones y registros gráficos efectuados a partir de dicha investigación, se logró reproducir artificialmente esta onda en costosos laboratorios destinados exclusivamente a la realización de ensayos en alta tensión. Una vez con la capacidad de reproducir esta onda artificialmente, la industria de los transformadores y aisladores cambió drásticamente al realizar elementos a prueba de sobretensiones atmosféricas, y todo esto gracias al entonces revolucionario Generador de Impulso de Tensión.

Un GIV tipo Marx, el cual es el más común, produce una forma de onda caracterizada por su valor de amplitud máxima, denominada tensión de ensayo, y por dos variables temporales: La primera conocida como tiempo de frente, el cual es el intervalo en que se logra el máximo valor de tensión de la onda, y la segunda denominada tiempo de cola, el cual es el intervalo en que se alcanza el 50% del valor pico de la onda cuando se está descendiendo.

Figura 1. Onda de un impulso de tensión estándar.



Fuente: Tomado de IEEE. (2013). IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques.

La onda estándar de un impulso de tensión se muestra en la figura 1, y se caracteriza por poseer un tiempo de frente y de cola de 1.2 y 50 μs respectivamente.

El **tiempo de frente** de la onda es el tiempo que le toma en alcanzar su amplitud máxima empezando desde cero. Debido a la dificultad al identificar los puntos inicial y máximo de la onda, se especifica el tiempo de frente T_1 como

$$T_1 = \frac{T_{90\%} - T_{30\%}}{0.9 - 0.3} \approx 1.67 * (T_{90\%} - T_{30\%}) \quad (1)$$

De la ecuación 1 se puede entender que se aproxima el tiempo de frente a la resta entre los tiempos del 90% y 30% lo que equivaldría a un 60% del tiempo de frente; esta resta se multiplica por 1,67 que es un factor obtenido de dicho 60%.

El tiempo de cola T_2 es el intervalo de tiempo entre el origen O_1 y el instante sobre la cola de la onda en el cual la tensión decrece hasta la mitad ó **50%** del valor pico.

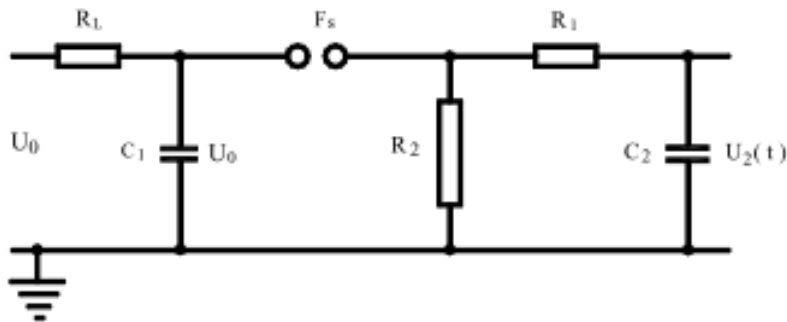
La onda estándar de impulso de tensión posee unas tolerancias para sus variables las cuales garantizarán que la onda generada se encuentre dentro de los límites de estandarización permitidos. [2]

- Valor pico (U_{\max}): $\pm 3\% = U_{\max} \pm 3\% \text{ kV}$
- Tiempo de frente (t_f): $\pm 30\% = 1.2 \pm 0.36 \mu\text{s}$
- Tiempo de cola (t_c): $\pm 20\% = 50 \pm 10 \mu\text{s}$

1.4.1 Generador tipo Marx de una etapa.

El circuito de una etapa para la generación de un impulso de tensión creado por el Dr. Emil Marx en Alemania, está compuesto por un capacitor C_1 que es cargado hasta su capacidad máxima de tensión U_0 por una fuente de tensión de entrada U_0 por medio de una resistencia de carga R_L

Figura 2. Circuito Marx de una etapa.



Fuente: Tomado de ROCA, S. (2005). Diseño y modelo a escala de un generador de impulsos de tensión.

Las esferas del explosor F_s son configuradas a una distancia programada para que permitan la descarga de la tensión acumulada en el capacitor C_1 en el instante $t = 0$ en el circuito conformado por las dos resistencias R_1 y R_2 , que se denominan resistencia de frente y de cola respectivamente, y una capacitancia de carga C_2 que representa el objeto bajo prueba.

Para finalizar, el capacitor C_2 se descargará a tierra a través de las resistencias de frente y cola, teniendo como resultado una onda de impulso de tensión en bornes del capacitor C_2 que se define por la ecuación 2

$$U_2(t) = U_0 * K * (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2)$$

Donde:

$U_2(t)$ = Tensión de impulso

U_0 = Tensión de carga de C1

K = Constante que depende del circuito seleccionado

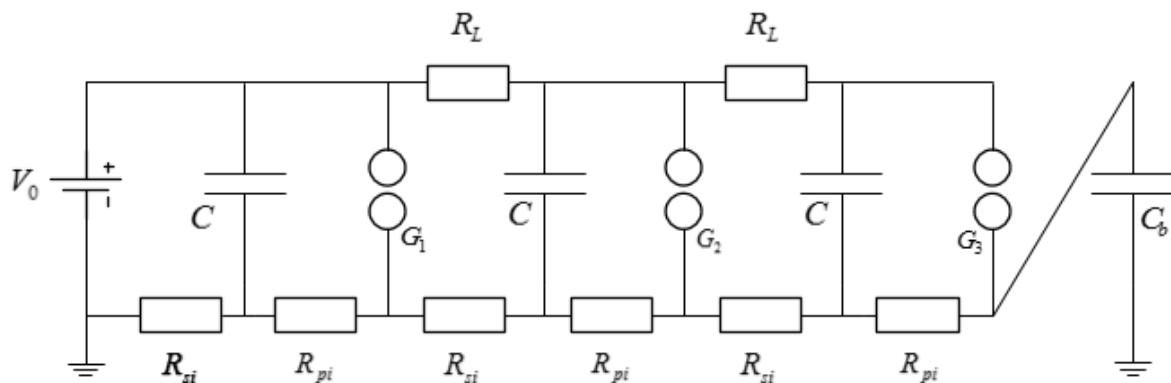
α y β = Raíces de la ecuación característica del sistema

Se puede abstraer de la ecuación 2 que la onda de tensión de tipo impulso está representada por una doble exponencial que incrementa en su valor de manera rápida hasta alcanzar su valor pico, y decrece relativamente lento en comparación a su rata de crecimiento. Los valores de α y β son los parámetros que controlan los tiempos de frente y cola de la onda respectivamente, y son estos parámetros los que se vuelven cruciales determinar para generar exactamente la misma onda repetitivamente en pruebas y ensayos. [3]

1.4.2 Generador tipo Marx de múltiples etapas.

Con el objetivo de obtener impulsos de tensiones con magnitudes mayores sin requerir una fuente de tensión extremadamente grande, y para mantener los costos del generador y de las pruebas reducidos, se llegó al generador multietapas cuya idea principal es la de cargar un número determinado de capacitores en paralelo, y descargarlos en serie a través de las resistencias de frente y cola de cada etapa. La tensión total obtenida sería igual a la tensión de entrada o carga multiplicada por el número de etapas en las que consista el generador. [4]

Figura 3. Circuito de un generador Marx multietapa (3 etapas).



Fuente: Elaboración propia.

Esta configuración multietapa del GIV tipo Marx comprende:

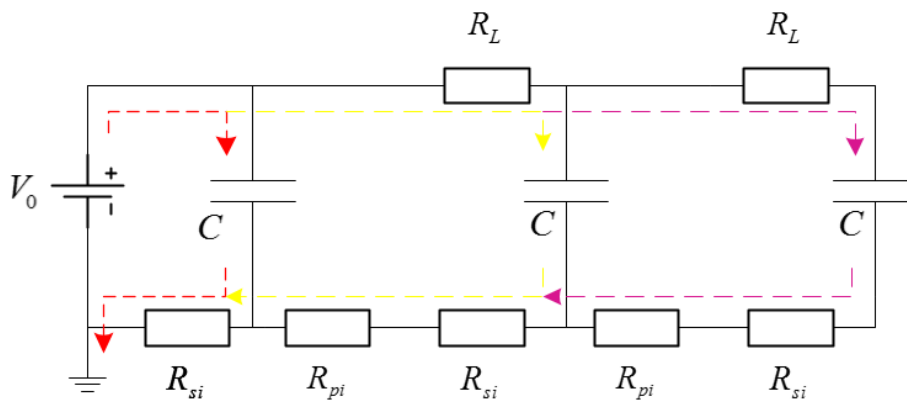
- Un capacitor C por cada etapa
- Una resistencia serie o de frente R_{si} por cada etapa
- Una resistencia paralelo o de cola R_{pi} por cada etapa
- Una resistencia de carga R_L por cada etapa
- Explosores G_i por cada etapa
- Un objeto de prueba C_b que se puede ver como un capacitor

En este sistema, la tensión de carga se le aplica a los capacitores a través de las resistencias de carga R_L que son de gran magnitud por lo general. Cuando se carga por completo el primer capacitor, este ocasiona una descarga por las esferas del explosor G_1 poniendo en serie los dos capacitores, lo cual causa que se sobrecargue el siguiente explosor y este permita una descarga que pone al capacitor tres en serie con los dos anteriores, y así sucesivamente.

Las resistencias de carga son elegidas para proveer una constante de tiempo típica de carga, así como una corriente de carga usual en estos generadores, la cual se encuentra en un rango de 50-100 mA [5]

1.4.3 Fase de carga del Generador Marx.

Figura 4. Fase de carga del generador Marx multietapa.



Fuente: Elaboración propia.

En esta etapa del generador Marx multietapas no se tienen en cuenta los espinterómetros pues no ha sucedido aún la descarga o disrupción del aislamiento entre ellos. Debido a esto, el circuito puede reducirse a la Figura 4 donde resulta mucho más claro la carga de los capacitores en paralelo a través de las

1.4.5 Energía entregada por el generador multietapas.

Debe recalcar que la energía que puede entregar el generador de impulso de tensión al objeto de prueba puede variar dependiendo del número de etapas, y de la configuración serie o paralelo de las mismas. La ecuación 3 muestra como está determinada dicha energía.

$$E = \frac{1}{2} * \frac{C_1}{n} * V_0^2 \quad (3)$$

Donde:

V_0 : Máxima tensión nominal (Voltaje de carga n veces)

n: Número de etapas

C_1 : Capacitancia de descarga

La capacitancia de descarga se puede expresar como se ve en la ecuación 4

$$C_1 = \frac{C}{n} \quad (4)$$

Donde

C= Capacitancia del generador

n: Número de etapas

“El número de etapas, la tensión nominal y la energía nominal almacenada son los parámetros más importantes de los generadores de impulso de tensión tipo Marx”.[3]

1.4.6 Eficiencia del generador de impulso de tensión tipo Marx.

Se puede derivar la eficiencia del generador usando las ecuaciones 3 y 4 en términos del voltaje pico de salida V_p y la tensión DC aplicada, V_o

$$\eta = \frac{V_p}{V_o} \quad (5)$$

De donde se puede derivar:

$$\eta = \left(\frac{1}{1 + (C_2 * n) * C_1} \right) * \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{R_1}{R_2} \right)} \right) \quad (6)$$

Donde:

C₁, C₂: Capacitancias de carga y descarga respectivamente

R₁, R₂: Resistencias de frente y cola respectivamente

n: Número de etapas

Para generadores de impulso de tensión tipo 1.2/50 µs y similares, un aumento en el valor de R₁/R₂ significa una reducción de eficiencia para valores de C₂/C₁ menores a 0.1. La eficiencia tiene un valor óptimo en un determinado valor de C₂/C₁, y un incremento o decremento en dicho valor significará una reducción en la eficiencia del generador. Puede darse el caso que tenga lugar una falla en el circuito si el valor de este cociente es muy pequeño.[3]

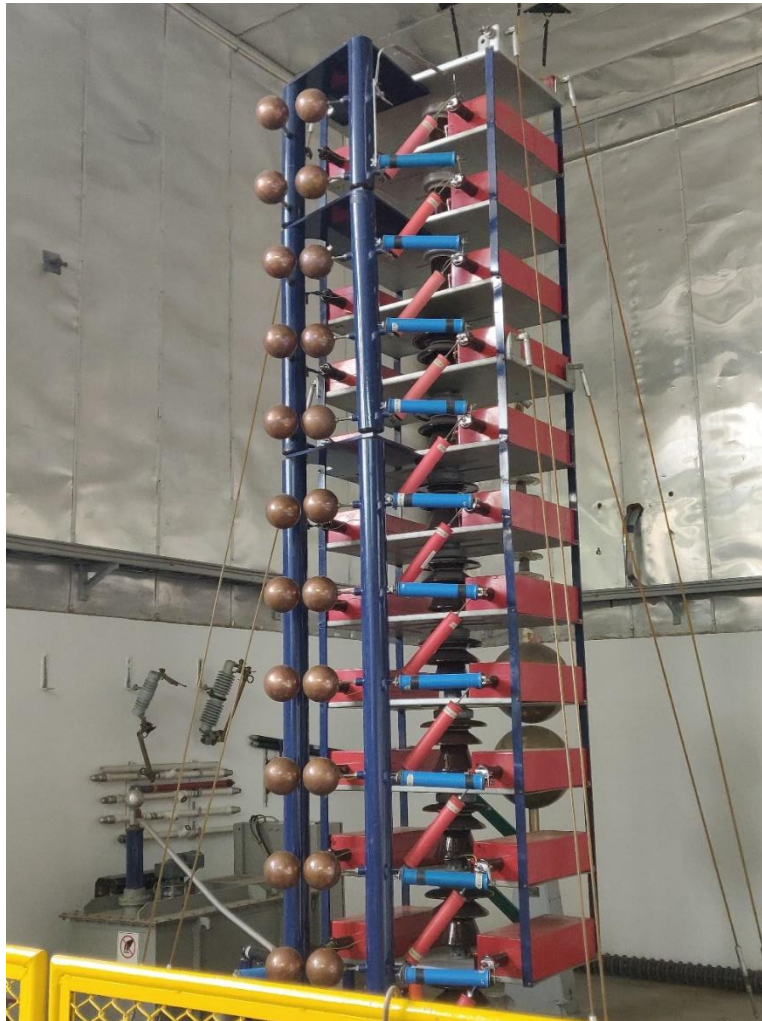
1.5 EL GENERADOR DE IMPULSOS DE TENSIÓN DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE

El generador de impulso Marx Serie E ubicado en LAT de la universidad del Valle está compuesto por 11 etapas, y en cada una de esta se ubican dos condensadores, un espinterómetro o explosores, resistencias de carga, de frente y de cola, formando un circuito multietapas capaz de generar un máximo 1.1 MV gracias a esta configuración.

Este generador fue donado por el Laboratorio de Alta Tensión EMC del instituto federal Suizo de Tecnología- EPFL, y cuenta además, entre otros componentes, con una consola de control y un transformador rectificador de carga.

El impulso de tensión estándar que es posible generar con este GIV es usado para variadas pruebas en transformadores, aisladores y demás elementos del sistema de potencia que se ven expuestos a descargas atmosféricas en su lugar de funcionamiento. En la Figura 6 a continuación se exhibe una imagen del GIV mencionado.

Figura 6. Generador de Impulsos de Tensión del LAT de la Universidad del Valle.



Fuente: Captura propia.

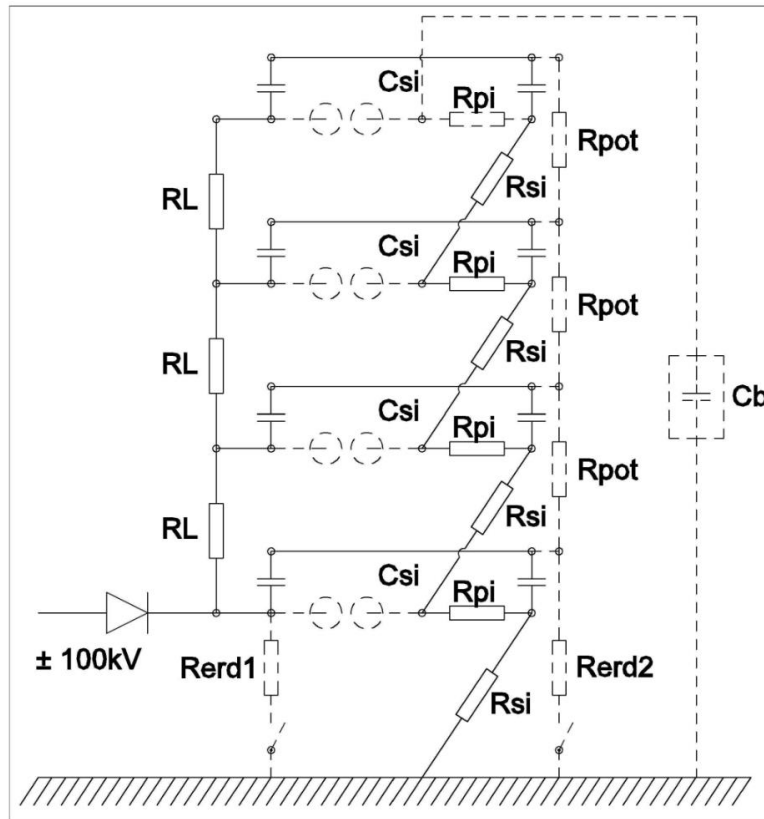
1.5.1 Especificaciones técnicas del GIV.

Se presentan las especificaciones técnicas del GIV serie E del LAT a detalle en la Tabla A.1.2 (Ver anexo A)

El generador se encuentra estructurado en una plataforma que permite su movimiento y cómodo ensamble y desensamble de sus partes cuando es necesario, otorgándole una característica de modularidad la cual será aprovechada para el ajuste o implementación de nuevos elementos al circuito, en caso de ser necesario, con el objetivo de implementar el GIC que se busca por medio de la transformación del GIV actual.

Dicho GIV se ensambla sobre una plataforma con ruedas que le provee de movilidad en el espacio asignado en caso de resultar necesaria su reasignación. Las 11 etapas se encuentran atornilladas a dos barras de sujeción color azul de 4.8 m de longitud aproximadamente. [6]

Figura 7. Circuito esquemático de 4 etapas del GIV del LAT.



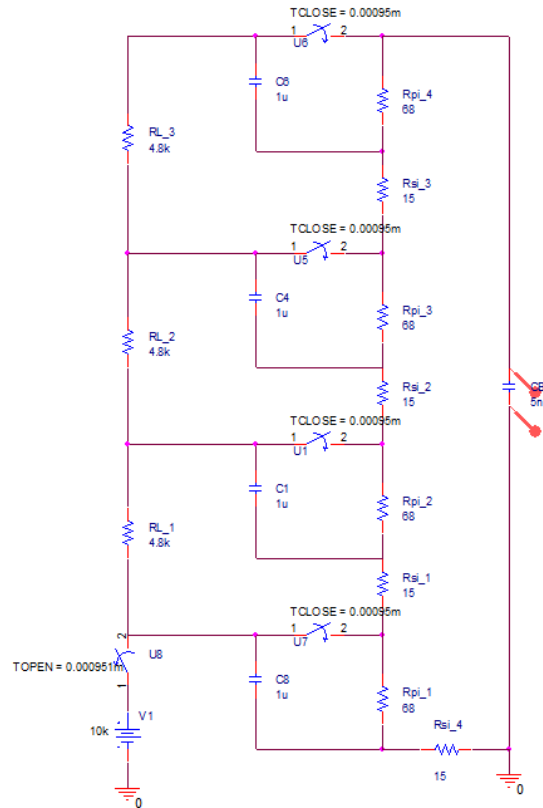
Fuente: Tomado de SILVA, A. Diseño del montaje de un generador de impulso de 1100 kV.

1.6 SIMULACIÓN DEL GENERADOR DE IMPULSOS DE TENSIÓN DEL LAT EN EL SOFTWARE ORCAD PSPICE

En la Figura 8 se puede apreciar el circuito implementado en el software OrCAD PSpice para la simulación del GIV del LAT, realizada con el objetivo de validar su funcionamiento y generar una mejor apropiación con el mismo.

Se debe recalcar la utilización de un interruptor cerrado U_8 con orden de apertura inmediatamente después de que se cierran los interruptores U_1 - U_7 que simulan los espinterómetros del generador; este interruptor cerrado se posicionó junto a la fuente de tensión DC y se utilizó para evitar que el flujo de corriente volviera a la fuente cuando el circuito estuviera en su fase de descarga.

Figura 8. Esquema de 4 etapas del GIV del LAT en el software OrCAD PSpice.



Se utilizó como base el circuito de la Figura 7 para elaborar el circuito en el software de simulación, utilizando el mismo nombre para las resistencias y capacitores involucrados, así como las mismas magnitudes del GIV real. Debe notarse que en la simulación se utilizó el equivalente a los dos capacitores de 1 μF en serie presentes en el GIV del LAT, y se añadió un interruptor **U₈** junto a la fuente de tensión de entrada para aislar la misma del circuito de descarga una vez los explosores permitan el paso de corriente a través de sus esferas. Los resultados de la simulación se exhiben a continuación.

1.6.1 Resultados obtenidos en la simulación.

Se puede apreciar en la Figura 9 la onda de impulso obtenida al simular el GIV en el software OrCAD PSpice. El primer resultado que se debe rescatar es el pico de tensión obtenido, pues como se puede analizar en la Figura 8, el valor de tensión DC de entrada es de 10 kV, pero el pico de tensión obtenido en el objeto de prueba cumple con el concepto de que la tensión de salida será igual a n veces la tensión de entrada, siendo n el número de etapas. Habiendo simulado 4 etapas en

esta ocasión, se esperaba un resultado aproximado a los 40 kV, obteniendo como resultado 37,714 kV como se puede observar en la Figura 10.

Figura 9. Onda obtenida mediante la simulación del circuito de 4 etapas del GIV.

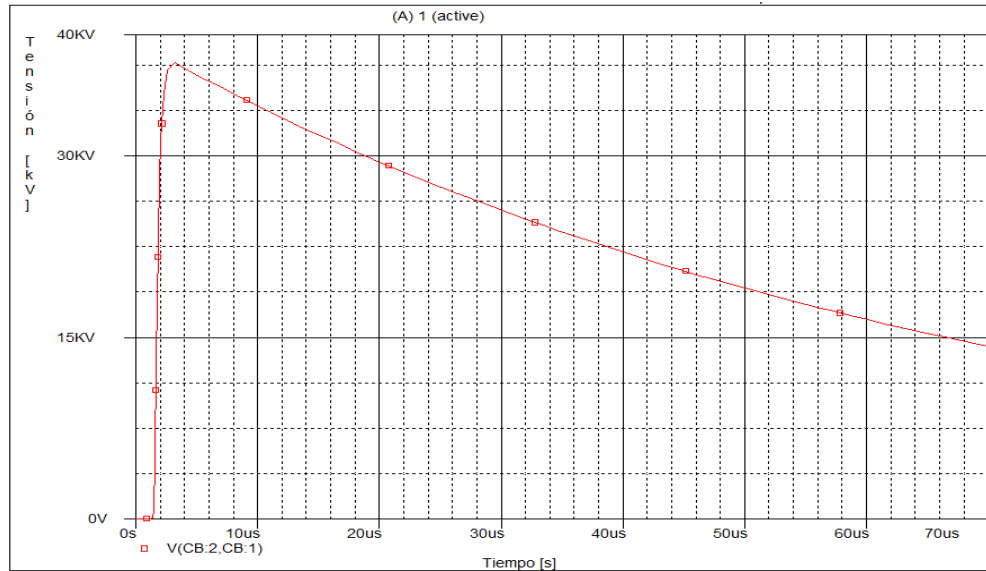
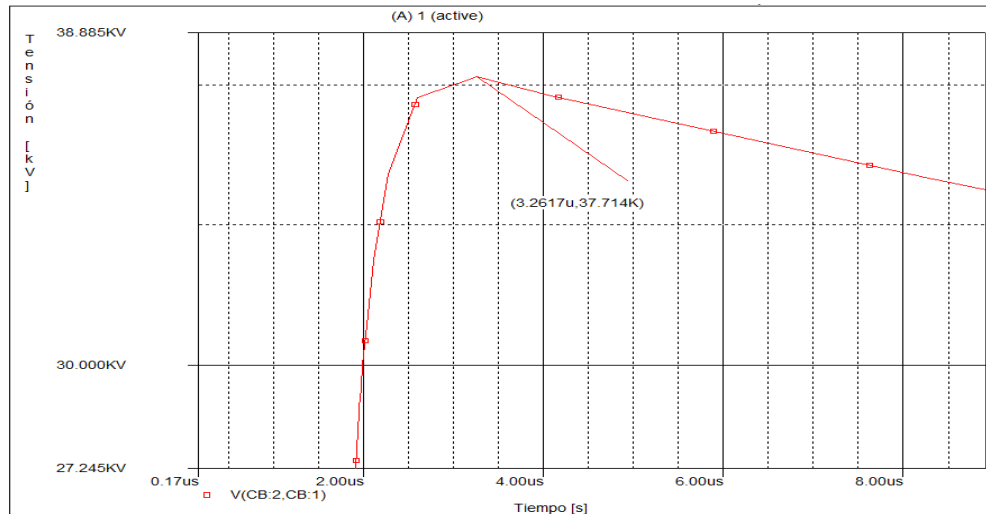


Figura 10. Pico de tensión obtenido en la simulación.



Se expondrá la comprobación de los tiempos de frente y cola respectivos de la onda obtenida con los parámetros sugeridos en la estándar IEEE de técnicas de pruebas en alta tensión, y concluir si esta onda se encuentra dentro de dichos parámetros, calificando su aceptabilidad. Se procederá según la ecuación 1 para hallar el tiempo de frente T_1 . Se hallan los tiempos del 90% y 30%:

$$0,9 * 37,714kV = 33,9426kV$$

$$0,3 * 37,714kV = 11,3142kV$$

Al situar los cursores en los valores más cercanos posibles a los previamente obtenidos como 90% y 30% de la tensión pico, se hallan los tiempos requeridos para el cálculo del tiempo de frente T_1 , los cuales se pueden corroborar en la Figura 11.

$$T_{90\%} = 2,1963 \mu s$$

$$T_{30\%} = 1,6292 \mu s$$

Aplicando la ecuación 1 se obtiene:

$$T_1 = 1,67 * (2,1963 - 1,6292) \approx 0,9471 \mu s$$

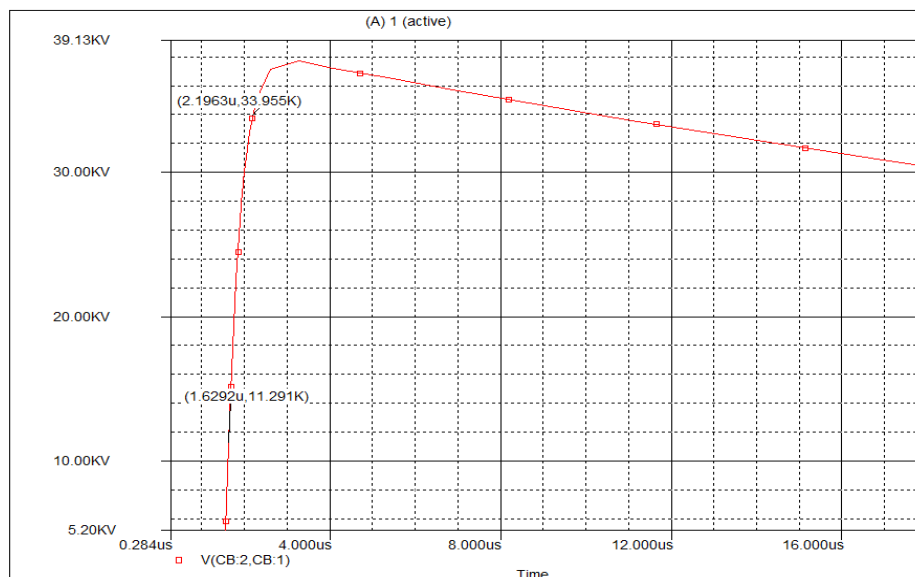
Según la estándar de IEEE, el tiempo de frente tiene una tolerancia del 30% para el valor de T_1 de $1,2 \mu s$, por lo que:

$$T_1 = 1,2 \pm 30\% \mu s$$

$$0,84 \mu s \leq T_1 \leq 1,56 \mu s$$

Se puede concluir pues, que el tiempo de frente T_1 obtenido en la onda resultado de la simulación de $0,9471 \mu s$ se encuentra dentro de los parámetros permitidos por la estándar de IEEE, otorgando una aceptación parcial de la onda.

Figura 11. Tiempos del 90% y 30% en la onda obtenida.



El tiempo de cola T_2 será el tiempo al cual la amplitud de tensión alcanza el 50% de su pico cuando va en bajada.

$$0,5 * 37,714kV = 18,857kV$$

Se localiza este valor de tensión con la ayuda del cursor y se obtiene el tiempo de cola de la onda resultado de la simulación que se puede apreciar en la Figura 12.

$$T_{50\%} = T_2 = 50,752\mu s$$

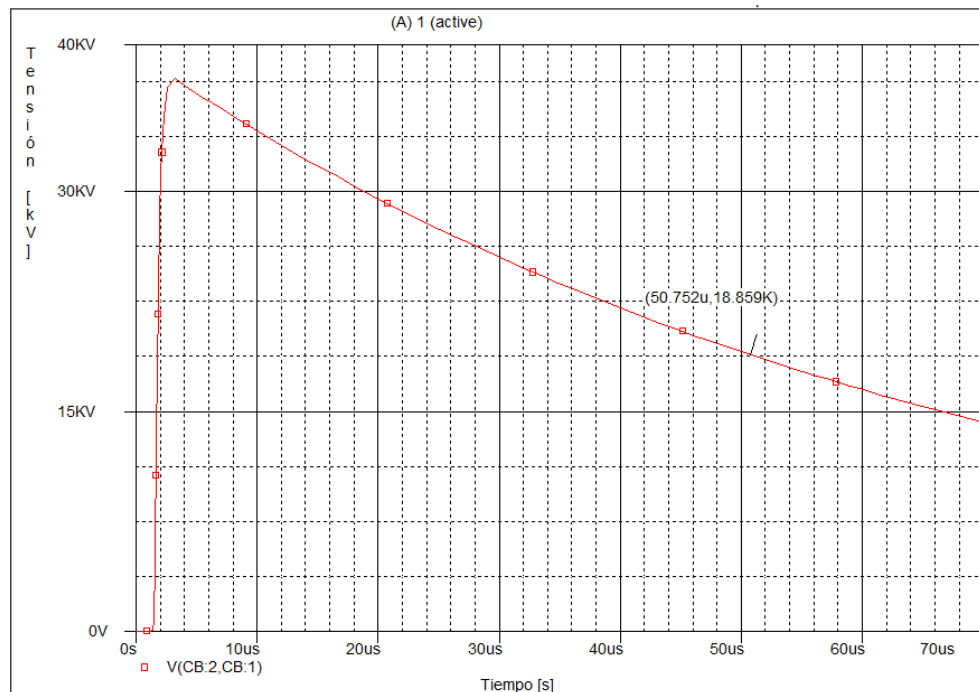
Según la estándar de IEEE, el tiempo de cola tiene una tolerancia del 20% para el valor de T_2 de 50 μs , por lo que:

$$T_2 = 50 \pm 20\% \mu s$$

$$40\mu s \leq T_2 \leq 60\mu s$$

Habiendo obtenido como resultado 50,752 μs para el valor de T_2 , se puede concluir que tanto tiempo de frente como tiempo de cola de la onda resultado de la simulación, cumplen con las tolerancias establecidas por la estándar de la IEEE, lo que significa que fue posible obtener una onda de impulso 1,2/50 μs estándar mediante simulación del generador tipo Marx presente en la LAT, utilizando los mismos valores de resistencias y capacitancias.

Figura 12. Tiempo de cola obtenido en la onda resultado de la simulación



CAPÍTULO DOS

“Nada en la vida debe temerse, solo debe ser entendido. Ahora es el momento de comprender más, para que podamos temer menos”. **Maria Salomea Sklodowska-Curie.**

No solo extremadamente elevados niveles de tensión son los que circulan por los sistemas de potencia y telecomunicaciones cuando son alcanzados por una descarga atmosférica, también corrientes tipo impulso que ocasionan daños en infraestructura e incluso en personas, generando fallas en los sistemas eléctricos y electrónicos adyacentes. Esto ha repercutido en la creación de variados elementos de protección contra sobretensiones como pararrayos o DPS que deben ser llevados a pruebas para garantizar su correcto funcionamiento en el campo.

Este capítulo presenta la teoría de funcionamiento de los generadores de impulso de corriente (GIC) y se aborda una fase de apropiación con el tema mediante simulación del mismo en el software OrCAD PSpice.

2. EL GENERADOR DE IMPULSO DE CORRIENTE (GIC)

2.1 CONCEPTOS GENERALES

Debido a la naturaleza caótica y destructiva de las descargas atmosféricas como fenómenos naturales, y las consecuencias que estas generan en las vidas humanas e instalaciones que se ven expuestas a dichas descargas, se volvió un asunto prioritario estudiar y simular estos fenómenos para lograr protecciones que garantizaran un ambiente seguro de trabajo para el ser humano y permitieran respaldar los elementos expuestos a dichos fenómenos.

Para lograr esto se requiere entonces un generador de impulso de corriente que pueda alcanzar determinadas amplitudes y formas de onda que garanticen un estándar propuesto

“El generador de Impulsos de corriente, por su amplio campo de acción, se constituye en un equipo básico del Laboratorio de Alta Tensión, puesto que sirve como herramienta de investigación de técnicas de medición de altas corrientes, como equipo de ensayo para pararrayos o de calibración de cápsulas magnéticas en Investigaciones sobre descargas atmosféricas: y como complemento docente a la teoría de alta tensión.” [7]

Existen 4 formas de onda estándares para los impulsos de corrientes las cuales son:

- El impulso de corriente 1/20 μ s
- El impulso de corriente 4/10 μ s
- El impulso de corriente 8/20 μ s
- El impulso de corriente 30/80 μ s

Las tolerancias especificadas por la estándar de la IEEE para estas formas de onda se expresan para:

- | | |
|---------------------|------------|
| a) Valor pico | $\pm 10\%$ |
| b) Tiempo de frente | $\pm 10\%$ |
| c) Tiempo de cola | $\pm 10\%$ |

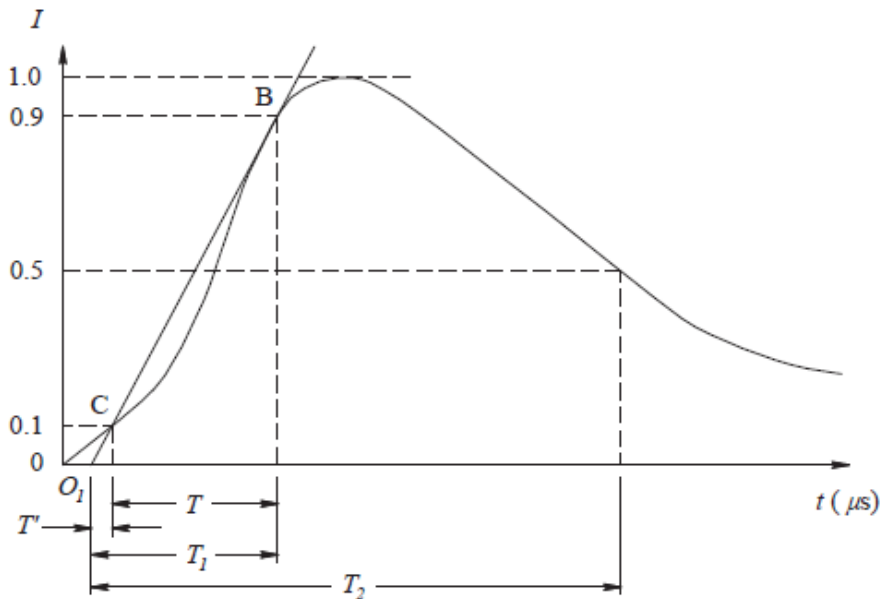
Por lo que los márgenes permitidos resultan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \pm 10\% \text{ para } T_1 \Rightarrow & \begin{cases} 0,9 \leq T_1 \leq 1,1 \mu s & \text{Para onda } 1/20 \mu s \\ 3,6 \leq T_1 \leq 4,4 \mu s & \text{Para onda } 4/10 \mu s \\ 7,2 \leq T_1 \leq 8,8 \mu s & \text{Para onda } 8/20 \mu s \\ 27 \leq T_1 \leq 33 \mu s & \text{Para onda } 30/80 \mu s \end{cases} \\ \pm 10\% \text{ para } T_2 \Rightarrow & \begin{cases} 18 \leq T_2 \leq 22 \mu s & \text{Para onda } 1/20 \mu s \\ 9 \leq T_2 \leq 11 \mu s & \text{Para onda } 4/10 \mu s \\ 18 \leq T_2 \leq 22 \mu s & \text{Para onda } 8/20 \mu s \\ 72 \leq T_2 \leq 88 \mu s & \text{Para onda } 30/80 \mu s \end{cases} \end{aligned}$$

Cualquier inverso de polaridad que pueda presentar la onda (*undershoot*) después que la corriente haya caído a cero **no debe ser mayor al 20%** del valor pico de amplitud.

También existen impulsos de corriente de formas de onda rectangulares que tienen duraciones pico de 500 μs , 1000 μs o incluso 2000 μs , pero estos son raramente necesarios y muy particulares. [2]

Figura 13. Onda de impulso de corriente estándar.



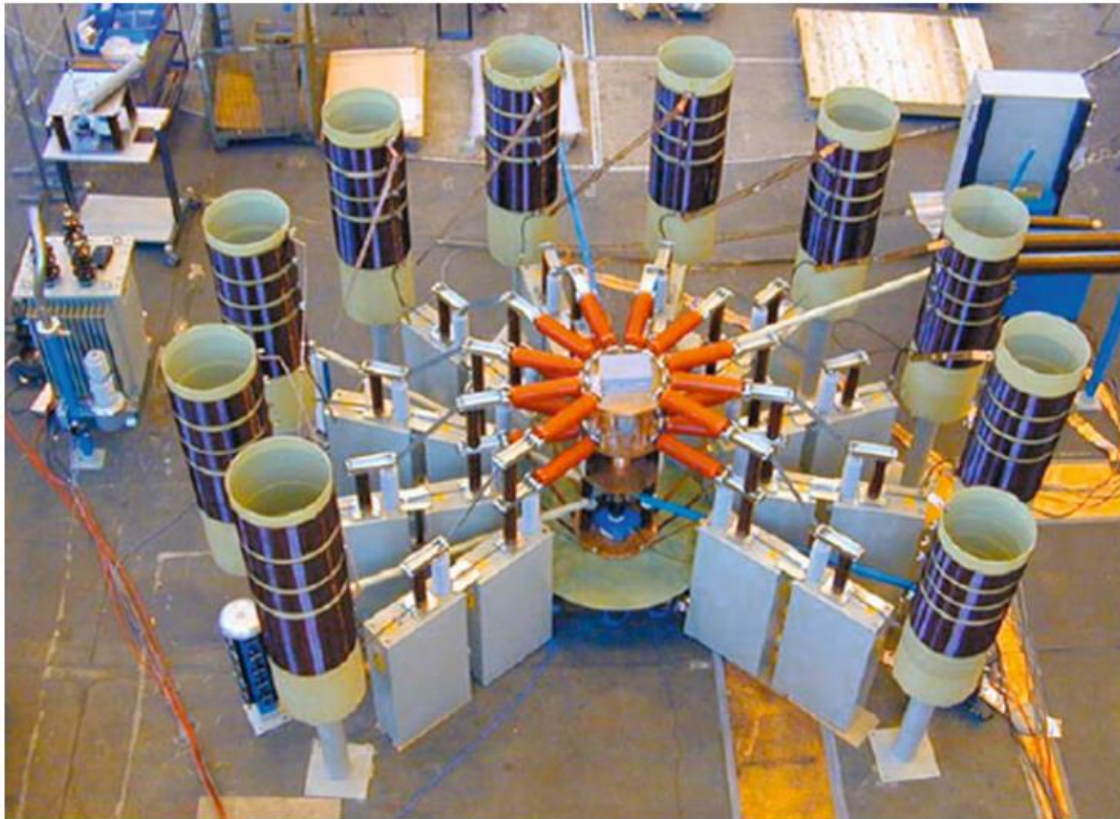
Fuente: IEEE. (2013). IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques

El tiempo de frente de la onda de impulso de corriente estándar T_1 se define como 1.25 veces el intervalo de los instantes cuando el impulso se encuentra al 10% y al 90% de su valor pico.

$$T_1 = \frac{T_{90\%} - T_{10\%}}{0,9 - 0,1} \approx 1,25 * (T_{90\%} - T_{10\%}) \quad (7)$$

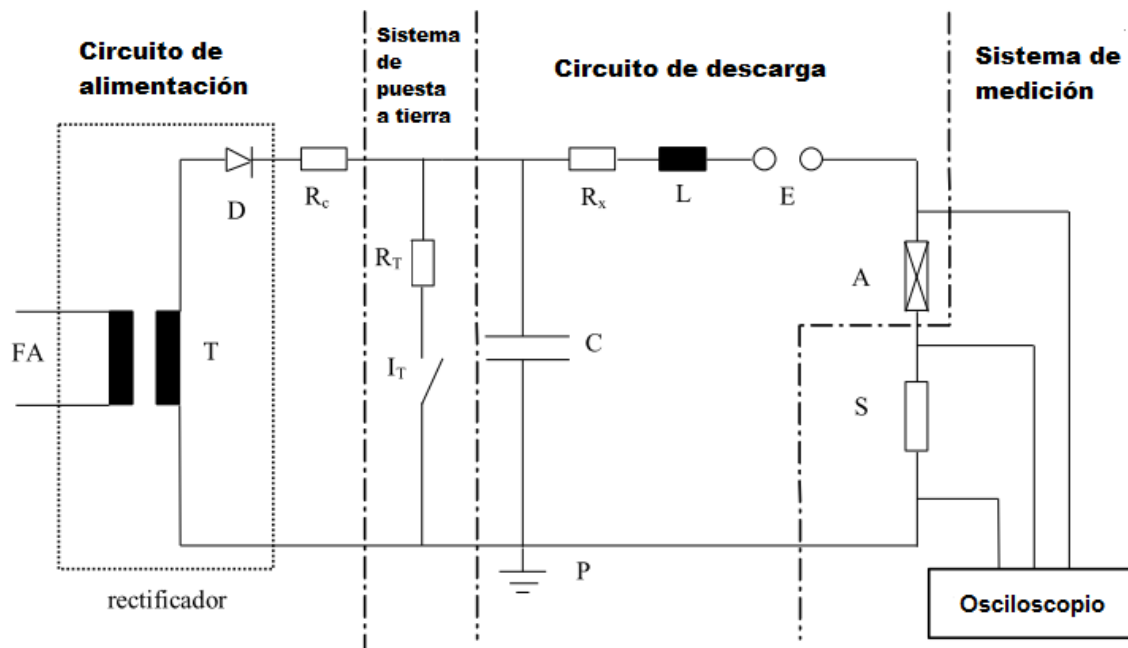
El tiempo de cola de la onda de impulso de corriente estándar T_2 se define como el tiempo en el que la onda alcanza el 50% del valor del pico de amplitud después de pasar por éste.

Figura 14. Ejemplo de un Generador de impulsos de corriente.



Fuente: Tomado de SCHON, K. (2013). High Impulse Voltage and Current Measurement Techniques.

Figura 15. Circuito generador de impulsos de corriente detallado.



Fuente: Tomado de BOSCH, R. Posada en funcionament d'un generador d'impulsos de corrent de 45 kA, 40 kJ.

En la Figura 15 se establece el circuito elemental para la generación de impulsos de corriente. Se compone básicamente de:

Un circuito de alimentación que comprende una fuente de tensión alterna, un rectificador constituido por un transformador elevador **T** y un diodo de alta tensión **D**. Su función reside entregar tensión continua al capacitor **C** para cargarlo, regulado mediante una resistencia de carga **R_c**.

Un sistema de puesta a tierra para liberar las posibles tensiones residuales presentes en los componentes más susceptibles, que comprende una resistencia y un interruptor, operables desde el puesto de control.

El circuito de descarga encargado de producir el impulso de corriente deseado, que se construye con una resistencia de choque **R_x**, una bobina de choque **L** y unos explosores o espinterómetros **E** que se pueden considerar como el interruptor del circuito, permitiendo el paso del arco eléctrico solo cuando la tensión en sus bornes es lo suficiente para romper la rigidez dieléctrica del aire; esta tensión se irá incrementando a medida que el capacitor **C** se va cargando. Se incluye de igual forma el objeto de prueba **A** cuya capacitancia equivalente diferirá según el elemento, factor a tener en cuenta ya que esto afectará los cálculos de las magnitudes de las resistencias necesarias.

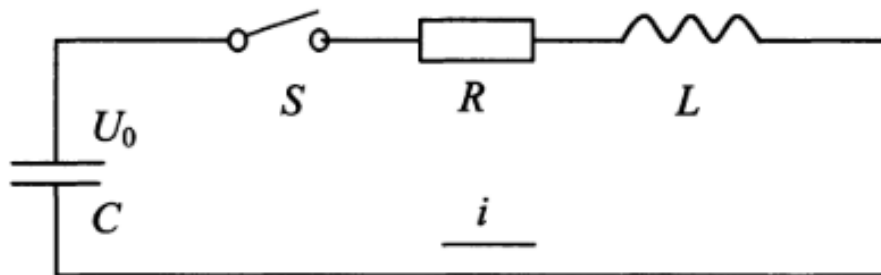
Finalmente se tiene el sistema de medición encargado de registrar la corriente de choque y tensión en bornes del objeto de prueba, y se constituye elementalmente de un elemento como un shunt de medida, una bobina de Rogowski o un transformador de corriente, simbolizado por la letra **S**, de tal forma que se permita la medición de grandes magnitudes de corriente de manera indirecta mediante su conexión en serie con el objeto a medir, y en paralelo con el sensor de medición que en este caso es un osciloscopio. [8]

Se puede apreciar la similitud de este circuito de la Figura 15 con el circuito del generador de impulsos de tensión tipo Marx de la Figura 2, y es que, en principio, un GIV puede ser acomodado de tal manera que en condiciones de corto circuito puedan generar impulsos de corriente. Las magnitudes alcanzables de corriente serán claramente menores a las esperadas para un GIC, esto dependiendo de los capacitores de carga **C** presentes en el GIV en cuestión. [9]

Los tiempos de frente y cola, **T₁** y **T₂**, pueden ser controlados para una capacitancia determinada con la manipulación instantánea de los valores de la resistencia **R_x** e inductancia **L**. De esta manera, **T₁** puede ser ajustado variando la inductancia y **T₂** será modificado con la ayuda de adición de resistencia. [10]

2.2 ANÁLISIS CIRCUITAL DEL GENERADOR DE IMPULSOS DE CORRIENTE

Figura 16. Circuito elemental de un generador de impulsos de corriente.



Fuente: Tomado de SONG, C. YAZHOU, C (2009). *Design and simulation of impulse current circuit based on the standard lightning currents.*

El banco de capacitores **C** es cargado mediante una fuente DC hasta un valor especificado para luego ser descargado a través del espinterómetro **G**, causando que la corriente de descarga **i_m** fluya por los elementos **R-L** del sistema. Se aplica entonces ley tensiones de Kirchhoff (KVL) y se determina la tensión **U₀** como:

$$U_0 = i_m \cdot R + L \frac{di_m}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i_m dt \quad (8)$$

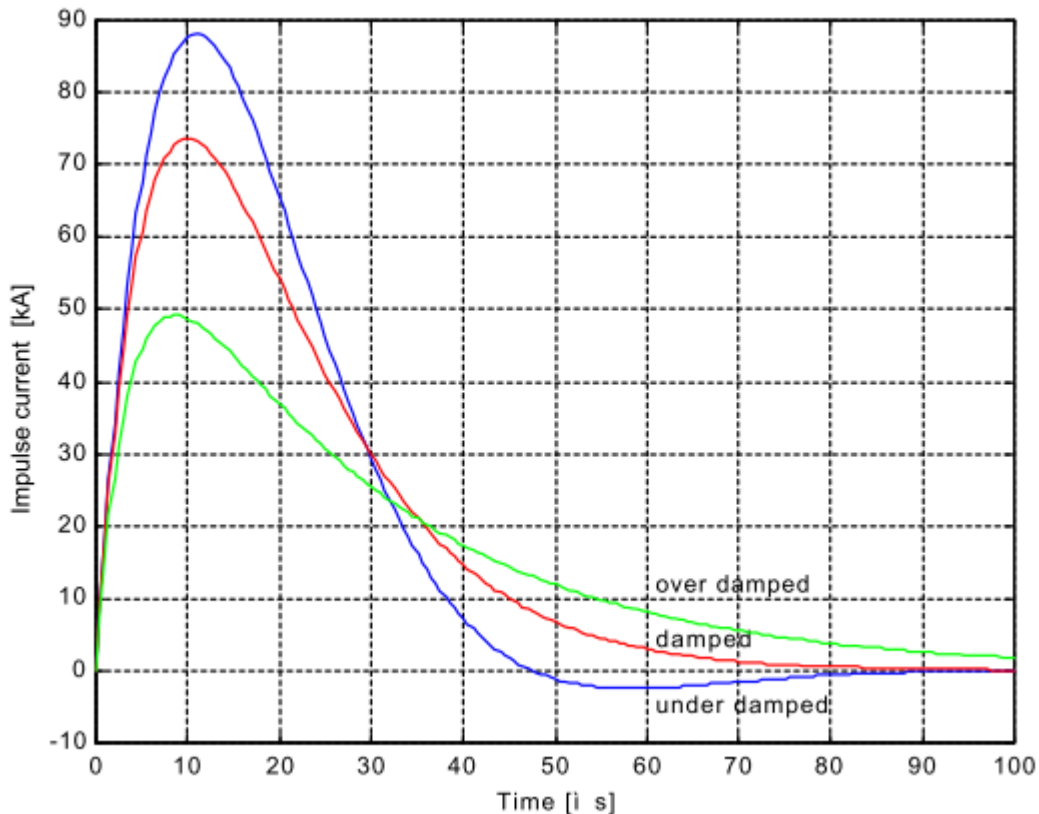
Fuente: Tomado de GONOS, I.F. LEONTIDES, N. et al. Analysis and design of an impulse current generator.

Esta ecuación posee tres soluciones distintas que corresponden a tres distintas condiciones de descarga de la corriente de impulso, las cuales están determinadas directamente por el valor del término $R - 2\sqrt{L/C}$. Si el valor de la resistencia **R** es ajustado para anular el término, la oscilación será **críticamente amortiguada** ($R = 2\sqrt{L/C}$).

Para un valor menor de **R** el término toma valores negativos y la oscilación se vuelve **sub- amortiguada** ($R < 2\sqrt{L/C}$)

Para un valor mayor de **R** el término toma valores positivos y la oscilación se vuelve **sobre- amortiguada** ($R > 2\sqrt{L/C}$) [10]

Figura 17. Diferentes condiciones de descarga en un GIC.



Fuente: Tomado de GONOS, I.F. LEONTIDES, N. et al. Analysis and design of an impulse current generator.

La Figura 17 muestra los distintos resultados posibles al variar el valor de resistencia en un circuito RLC con los demás componentes fijos. Para $U_0 = 100$ kV, $C = 20$ μ F y $L = 5$ μ H, se obtiene una respuesta sobre-amortiguada para una $R = 1.5$ Ω , una respuesta críticamente amortiguada para $R = 1$ Ω y una respuesta sub-amortiguada para $R = 0.75$ Ω .

Si se decidiera obtener una onda críticamente amortiguada tal que $R = 2\sqrt{L/C}$, se tendría un impulso de corriente dado por la expresión:

$$I(t) = \frac{U_0}{L} t \cdot e^{-\frac{R}{2L}t} \quad (9)$$

Fuente: Tomado de GONOS, I.F. LEONTIDES, N. et al. *Analysis and design of an impulse current generator*.

Resolviendo la ecuación 9 en los puntos de la onda donde se alcanza el 10%, 90% y 50% del valor pico, se derivan las siguientes expresiones para los parámetros de tiempo:

$$T_1 = 1.43 \frac{L}{R} \quad (10)$$

Fuente: Tomado de GONOS, I.F. LEONTIDES, N. et al. *Analysis and design of an impulse current generator*.

$$T_2 = 5.42 \frac{L}{R} \quad (11)$$

Por ende se puede observar que la relación T_1 / T_2 para el caso de onda críticamente amortiguada resulta independiente de los elementos R , L y C :

$$\frac{T_1}{T_2} = 0.26 \quad (12)$$

Fuente: Tomado de GONOS, I.F. LEONTIDES, N. et al. *Analysis and design of an impulse current generator*.

Considerando la tolerancia otorgada por la norma de $\pm 10\%$ para T_1 / T_2 , la Tabla 1 especifica los límites permitidos para la relación T_1 / T_2 de las ondas de impulso de corriente. Así las cosas, resulta **imposible** generar una onda con respuesta críticamente amortiguada que cumpla con los requerimientos del standard de la *IEEE*, pues la relación T_1 / T_2 falla en acceder a los límites mencionados.[10][10] Inevitablemente pues, las pruebas que requieran impulsos de corriente estándares tendrán que desarrollarse con ondas oscilantes sub-amortiguadas o sobre-amortiguadas. [10]

Tabla 1. Límites para el parámetro de tiempo T_1 / T_2 de las ondas de impulso de corriente.

Límites para T_1/T_2 en impulsos de corriente				
Impulso	1/20 μs	4/10 μs	8/20 μs	30/80 μs
T_1 / T_2	0.04-0.06	0.33-0.49	0.33-0.49	0.31-0.46

Fuente: Tomado de GONOS, I.F. LEONTIDES, N. et al. *Analysis and design of an impulse current generator*.

La Figura 17 permite observar las ventajas y desventajas en la utilización de un tipo u otro de respuesta; con la onda sobre-amortiguada se obtiene una reducción muy significativa en la amplitud de la onda y, consecuentemente, en la utilización del factor I_{\max} / U_0 del generador de impulsos. De manera alterna, la respuesta sub-amortiguada maximiza la utilización de dicho factor pero se debe prestar atención a la amplitud del pico negativo obtenido en la onda, pues tiende a presentar valores elevados y, acorde al standard de la *IEEE*, cualquier cambio de polaridad presentado después que la onda haya caído a su valor cero no debe sobrepasar en amplitud más del 20% de la amplitud del valor pico [2].

De esto se puede extraer que la relación entre el valor pico de la polaridad inversa I_{\min} y el valor del primer pico de la onda debe ser:

$$\left| \frac{I_{\min}}{I_{\max}} \right| \leq 0.2 \quad (13)$$

Para lograr una respuesta **sub-amortiguada** de la onda de impulso a generar se debe recurrir entonces a una resistencia equivalente del circuito:

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (14)$$

La expresión de la ecuación 14 da a conocer entonces el límite superior o máximo para la resistencia equivalente del circuito **R** para lograr una respuesta sub-amortiguada de la onda de impulso generada.

Resolviendo la ecuación 8 para:

$$Z = \sqrt{R^2 - 4L/C} \quad (15)$$

Fuente: Tomado de GONOS, I.F. LEONTIDES, N. et al. *Analysis and design of an impulse current generator*.

Y para:

$$\omega = \frac{Z}{2L} \quad (16)$$

Fuente: Tomado de GONOS, I.F. LEONTIDES, N. et al. Analysis and design of an impulse current generator.

Se obtiene la expresión para la corriente variante en el tiempo para $R < 2\sqrt{L/C}$ de:

$$I(t) = \frac{U_0}{\omega \cdot L} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin(\omega \cdot t) \quad (17)$$

Fuente: Tomado y editado de GONOS, I.F. LEONTIDES, N. et al. Analysis and design of an impulse current generator.

Debido a la característica oscilante de la onda esta presentará más de un pico, entre ellos los que poseen polaridad negativa por supuesto. El tiempo que toma la onda en subir desde cero hasta el **primer** pico se define como:

$$T = \frac{2}{\omega} \arctan\left(\frac{\sqrt{R^2 + (2\omega L)^2} - R}{2\omega L}\right) \quad (18)$$

Fuente: Tomado de GONOS, I.F. LEONTIDES, N. et al. Analysis and design of an impulse current generator.

Por consiguiente, la amplitud I_{\max} de la onda de corriente en este pico se calcula como:

$$I_{\max} = \frac{U_0}{\omega \cdot L} e^{-\frac{R}{2L}T} \sin(\omega \cdot T) \quad (19)$$

Fuente: Tomado de GONOS, I.F. LEONTIDES, N. et al. Analysis and design of an impulse current generator.

El respectivo tiempo T' desde cero hasta el primer pico de polaridad inversa se puede expresar como:

$$T' = T + \frac{\pi}{\omega} \quad (20)$$

Fuente: Tomado de GONOS, I.F. LEONTIDES, N. et al. Analysis and design of an impulse current generator.

Así las cosas, reemplazando T' en la variable t en la ecuación 17 se obtiene la expresión para la mínima amplitud de corriente de la onda de impulso:

$$I_{\min} = -I_{\max} \cdot e^{-\pi \frac{R}{Z}} \quad (21)$$

Fuente: Tomado de GONOS, I.F. LEONTIDES, N. et al. Analysis and design of an impulse current generator.

Con los valores de I_{\max} e I_{\min} expresados en las ecuaciones 19 y 21 respectivamente, se reemplazan así en la ecuación 13 sobre la relación reglamentaria entre las amplitudes del primer pico de corriente y el pico de polaridad inversa y se obtiene:

$$Z \leq \frac{\pi}{\ln(0.2)} \cdot R \quad (22)$$

Fuente: Tomado de GONOS, I.F. LEONTIDES, N. et al. Analysis and design of an impulse current generator.

Se reemplaza Z de la ecuación 15 y se obtiene así la magnitud mínima de la resistencia para cumplir con la condición:

$$R \geq 1.1 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (23)$$

Fuente: Tomado de GONOS, I.F. LEONTIDES, N. et al. Analysis and design of an impulse current generator.

Este valor representa entonces el límite inferior para la magnitud de la resistencia R del circuito de descarga buscando cumplir con el requerimiento del standard de la *IEEE* referente a la amplitud del pico de polaridad inversa I_{\min} manteniéndose por debajo del 20% del pico principal de corriente I_{\max} . [10]

2.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS DEL CIRCUITO DEL GIC

En la Figura 16 se exhibe el circuito básico necesario para la generación de impulsos de corriente, el cual consiste en una simple malla de elementos **RLC** en conjunto con un par de explosores o espinterómetros **G** que se simplifican como un interruptor **S** dado su función de permitir el paso de corriente en un instante en específico, y una fuente de tensión continua **U₀** que se encarga de cargar el capacitor hasta el momento de cierre del interruptor donde empieza la fase de descarga del circuito. El capacitor **C** del circuito puede consistir en uno o múltiples capacitores en un arreglo en paralelo que forman un banco, la resistencia **R** representa la resistencia equivalente del objeto de prueba y la añadida por los conductores del circuito, mientras que **L** puede ser un inductor o bobina de núcleo de aire que soporte altas corrientes.

Se obtendrá así una corriente i circulante por la malla con una forma de onda tipo impulso, una amplitud I_{\max} , un pico de polaridad inversa I_{\min} y unos tiempos de frente y cola T_1 y T_2 , variables que se verán determinadas según la configuración RLC del propio circuito.

El tipo de impulso a generar está directamente relacionado con la necesidad u objetivo del laboratorio. Para la realización de pruebas en DPS, el cual es el objetivo general de este trabajo de grado, resulta viable generar un impulso 8/20 μ s, requerido en pruebas como:

- Ensayo de tensión residual de impulso tipo rayo
- Ensayo para verificar la rata de transferencia de carga repetitiva Qrs.

Las cuales se abordarán más a fondo en el siguiente capítulo de este trabajo de grado. Resulta entonces la duda, ¿cómo lograr una onda de 8/20 μ s estándar con una amplitud de corriente determinada?

En la práctica, existen ciertas relaciones entre los componentes del circuito previamente mencionados (**C**, **L** y **R**, mientras estén expresados en μ F, μ H y Ω) para alcanzar los tiempos de frente y cola requeridos según la necesidad. Para un impulso de corriente con forma de onda 8/20 μ s se conocen ya las relaciones que permiten determinar los valores de los parámetros y se presentan a continuación:

Tabla 2. Relaciones entre componentes RLC para onda 8/20 μ s.

Relaciones entre componentes RLC para onda 8/20 μ s			
$\alpha = \frac{R}{2L} = 0.0535 \times 10^6$	(24)	$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = 0.113 \times 10^6$	(25)
$L \cdot C = 65$	(26)	$i_m = \frac{VC}{14}$	(27)

Fuente: Tomado de HALIM, N. AZMI, A. et al. (2011) Development of a small scale standard lightning impulse current generator.

A partir de las expresiones de la Tabla 2 es posible hallar matemáticamente los valores de los parámetros **RLC** necesarios para generar un impulso de corriente de 8/20 μ s, teniendo un valor fijo para una de las variables y despejando los valores para las demás. [11]

Se puede inferir además que la máxima amplitud de corriente que se puede llegar a generar está definida por la magnitud de tensión de entrada y la capacitancia del circuito, por lo que al elevar el valor de cualquiera de las dos variables se obtendrá un aumento en la amplitud de corriente. Sin embargo, la capacitancia del circuito está atada a la inductancia para conservar los tiempos de frente y cola según la

ecuación 26, por lo que la solución más sencilla para lograr un aumento o disminución de la corriente sin modificar los tiempos T_1 y T_2 resulta ser la modificación respectiva de la amplitud de tensión de entrada U_0 . Esto se puede comprobar analizando la Tabla 3.

En dicha tabla se pueden apreciar múltiples ejemplos de obtención de parámetros para distintos valores de capacitancia C y U_0 , hallados según las expresiones de la Tabla 2. En el subcapítulo 2.5 se procederá a simular estos ejemplos con la ayuda del software *OrCAD PSpice* para observar la validez de las expresiones usadas en la determinación de los parámetros del sistema.

Tabla 3. Ejemplos de determinación de parámetros para distintas capacitancias y tensiones de entrada.

PARA ONDA DE IMPULSO DE CORRIENTE 8/20 μs				
U_0 (kV)	C (μF)	L (μH)	R (Ω)	I_{max} Teórica (kA)
30,00	2	32,50	3,48	4,29
30,00	0,6	108,33	11,59	1,29
30,00	8	8,13	0,87	17,14
60,00	2	32,50	3,48	8,57

2.4 SISTEMAS DE MEDICIÓN PARA IMPULSOS DE CORRIENTE

Muchos de los componentes necesarios para los sistemas de medición de impulsos de corriente son los mismos aquellos que se utilizan en los sistemas de medición de impulsos de tensión, y deben cumplir con los requerimientos con la estándar de la *IEEE* plantea. Es importante que la inserción del circuito de medida en el circuito de ensayo no introduzca impedancias indeseables. Los componentes más usuales de un sistema de medición de impulsos de corriente se presentan a continuación.

2.4.1 Dispositivo Convertidor.

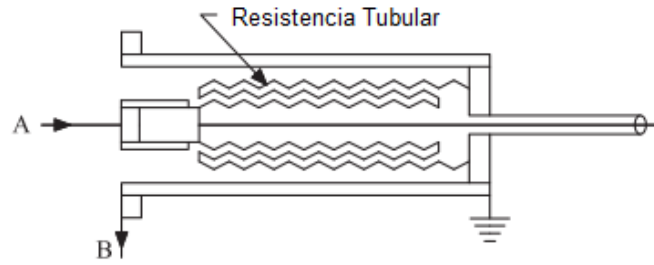
Encargado de proporcionar magnitudes soportables para los dispositivos de medición o censo de señales, realizando así una medición indirecta. Pueden ser:

- a) **Resistencia Shunt:** La forma más común de un shunt para medición es la cual tiene una construcción tubular. Está construido por dos tubos metálicos coaxiales aislados eléctricamente, a excepción de uno de los extremos. Los dos puntos de medición de la tensión son a la entrada del tubo interior y a la salida del mismo. La resistencia del material debe ser no-magnética con un coeficiente resistivo de baja temperatura que permita evitar posibles errores cuando se realice la medición. Existen 3 tipos de shunts tubulares que se detallan a continuación en la Figura 18
- b) **Transformadores de corriente (TC):** Los T.C especiales de banda ancha pueden ser utilizadas para la medición de impulsos de corriente de corta duración. Poseen cierta ventaja sobre los shunts debido a que permiten el aislamiento de la tierra y por ende, pueden ser localizados arbitrariamente en cualquier parte del circuito de corriente.
- c) **Bobina de Rogowski (RC):** Estas bobinas proveen una salida de tensión proporcional a la rata de cambio de la corriente medida por el sensor. Estos sensores tienen las siguientes características: Alto rango de medida (la misma bobina puede medir corrientes desde 1 A hasta 100 kA), respuesta lineal a frecuencias hasta 10MHz, las tipo ventana proveen resistencia de corto circuito ilimitada y aislamiento galvánico de los conductores primarios (similar a los TC)

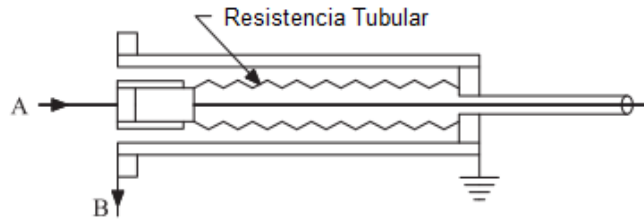
Para la medición de impulsos de corriente de altas amplitudes resulta mejor la utilización de una bobina de Rogowski debido a que su conductor este enrollado alrededor de un núcleo de aire, por lo que se evita la saturación que produce un núcleo de hierro. Además, debido a que existe un aislamiento total entre conductores primario y secundario, no existe riesgo de un daño en el secundario debido a las altas corrientes que se generan en el primario. [12]

La bobina de Rogowski debe estar conectada a un circuito integrador (dispositivo electrónico) que provee una señal de salida proporcional a la corriente de salida de la bobina. (Ver Figura 19). Básicamente, la salida de tensión de la RC representa el cambio de la corriente que pasa por el conductor en medición, por lo que es la función del integrador generar la señal de corriente original.[12], [13]

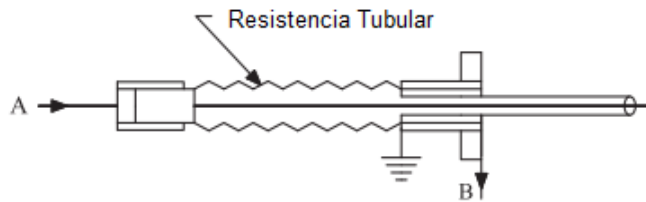
Figura 18. Tipos de resistencias shunt tubulares para medición de impulsos de corriente.



a) Resistencia shunt de tubo múltiple y retorno coaxial



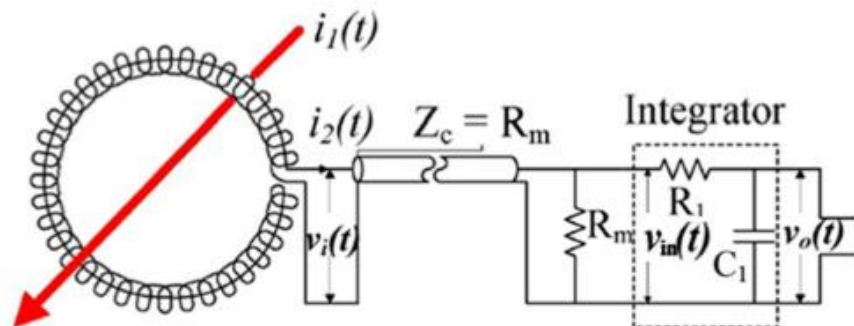
b) Resistencia shunt de retorno coaxial



c) Resistencia shunt de retorno no coaxial

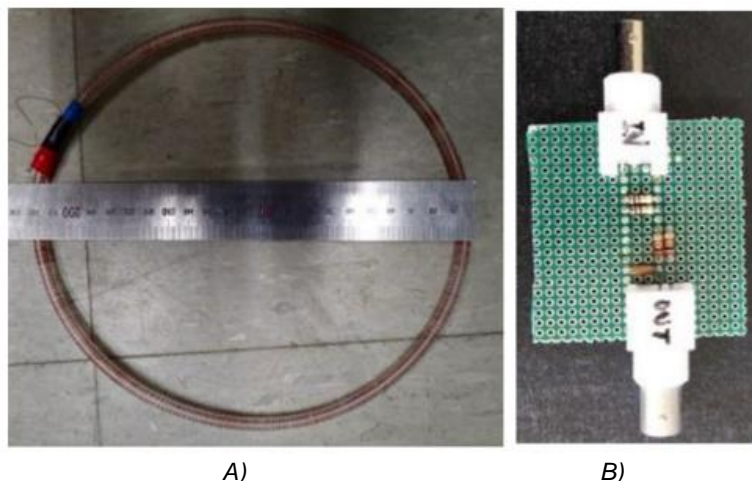
Fuente: Tomado y editado de IEEE. (2013). IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques

Figura 19. Esquema de bobina de Rogowski con integrador.



Fuente: Tomado de J. Hyuk, L. Hong, et al. (2019). Simulation and Development of Rogowski Coil for Lightning Current Measurement

Figura 20. A) Ejemplo real de bobina de Rogowski. B) Integrador



Fuente: Tomado de J. Hyuk, L. Hong, et al. (2019). *Simulation and Development of Rogowski Coil for Lightning Current Measurement*

2.4.1 Conductores.

Deben minimizarse en la medida de lo posible para evitar su influencia en la onda a obtener, caso que puede presentarse debido a los componentes resistivos e inductivos de los mismos. Siempre se deben intentar conexiones directas entre el dispositivo de medida y el circuito del generador. En el caso que no sea esto posible, e.g al realizar la conexión en serie de algunos objetos de prueba al dispositivo de medida que por su forma compliquen o imposibiliten las conexiones directas, la mejor opción serán los conductores metálicos tipo lámina que minimicen la inductancia añadida al circuito.

2.4.2 Cable de Medida.

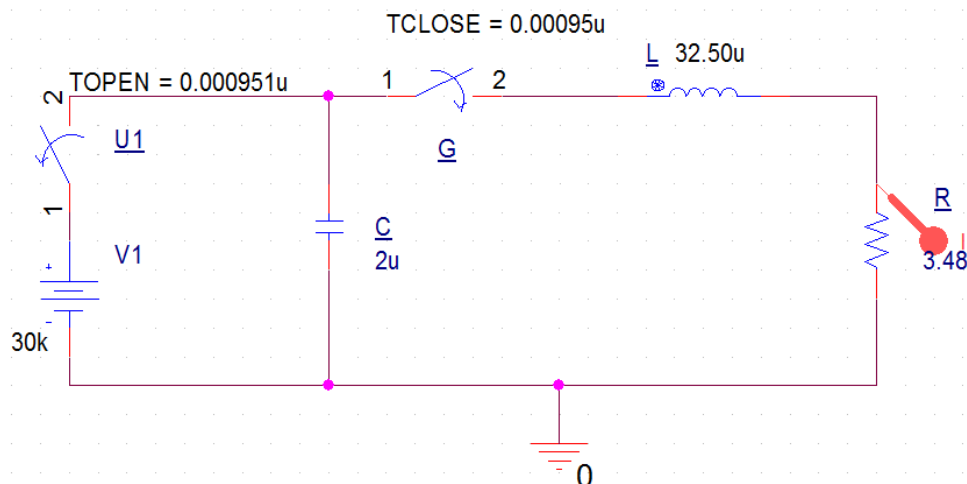
Es posiblemente el elemento más delicado del sistema, aún más cuando debe tener largas longitudes. Se recomienda utilizar un cable coaxial del tipo alta frecuencia que este aislado del aire mediante polietileno o similares. [8]

2.4.3 Registrador de Señales.

Este elemento debe ser un osciloscopio capaz de captar señales con las magnitudes y características esperadas a obtener a la salida del GIC. También podría llegar a ser reemplazado por un grabador de impulsos digital o un instrumento de lectura de picos.[2]

2.5 SIMULACIÓN DEL GIC EN EL SOFTWARE ORCAD PSpICE

Figura 21. Esquema básico de circuito un GIC simulado en el software OrCAD PSpice.



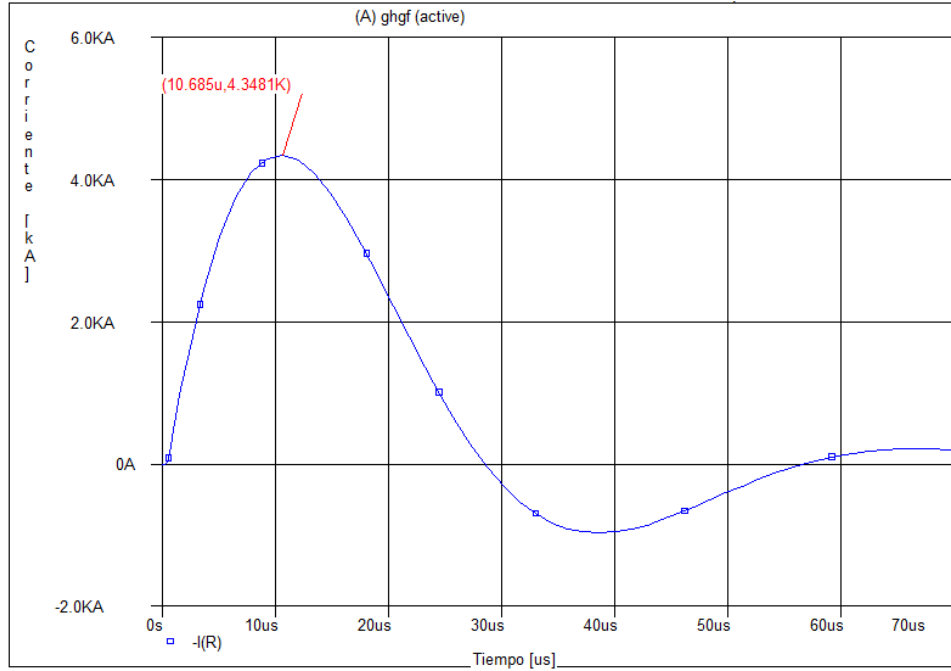
La Figura 21 representa el esquema utilizado en el software OrCAD PSpice para simular un generador de impulsos de corriente, elegido según la teoría estudiada en este capítulo. El esquema consta de una fuente de tensión continua V_1 , un par de explosores G , y una malla con los componentes R , L y C necesarios para producir el impulso requerido. El interruptor U_1 cumple la función de aislar la fuente del circuito RLC un instante después que el espinterómetro G permita el paso de corriente por la malla. Este arreglo está basado en la Figura 16 de la fase teórica del GIC. El objetivo de esta simulación es el de evaluar la validez de la teoría propuesta y para ello se han puesto los valores del primer ejemplo de la Tabla 3 en los componentes del circuito, para así corroborar los resultados teóricos con los obtenidos en la simulación.

Se aplica el procedimiento expuesto en la ecuación 7 para hallar el tiempo de frente T_1 , y el tiempo de cola T_2 se expresa como el tiempo en el que la onda alcanza el **50%** de la máxima amplitud después de pasar el primer pico. También se analiza la amplitud del pico de corriente de polaridad inversa que no debe exceder el **20%** de la amplitud del primer pico de corriente.

Tabla 4. Resultados obtenidos para el circuito de la Figura 21.

Resultados Onda Simulada					
U_0 (kV)	T_1 (μs)	T_2 (μs)	I_{maxT} (kA)	I_{maxR} (kA)	I_{min} (kA)
30	7,81	20,64	4,29	4,35	0,96

Figura 22. Onda de impulso de corriente obtenida al simular el circuito Figura 21



Teniendo en cuenta los límites establecidos por la estándar de la *IEEE* para los tiempos de frente ($7.2 \mu s < T_1 < 8.8 \mu s$) y cola ($18 \mu s < T_2 < 22 \mu s$) se puede concluir que los resultados obtenidos cumplen con los requerimientos para una onda de 8/20 μs . La amplitud de corriente obtenida $I_{\max R}$ es muy cercana a la amplitud de corriente esperada $I_{\max T}$ según la teoría revisada, presentando un porcentaje de diferencia del 1.4%.

Sin embargo, la amplitud del pico de corriente de polaridad inversa I_{\min} obtenido (0.96 kA) resulta ser mayor del 20% de $I_{\max R}$ (0.87 kA) incumpliendo el dictamen que la estándar de la *IEEE* propone.

Existe un valor mínimo matemático para el valor de la resistencia del sistema R para garantizar que este pico de amplitud de polaridad inversa no sea mayor del 20%, cuya expresión está dada según la ecuación 23. De igual manera, existe un valor máximo para el valor de la misma resistencia R que garantiza una respuesta de onda **sub-amortiguada**, siendo esto último lo que se busca en este tipo de pruebas, y se expresa como: [11]

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (28)$$

Por consiguiente, el valor de resistencia del sistema R debe mantenerse en un intervalo definido para garantizar ambas condiciones y se ve expresado como:

$$1.1\sqrt{\frac{L}{C}} \leq R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (29)$$

Se procede entonces a revisar si el valor estimado de resistencia **R** obtenido mediante despeje en la ecuación 24 se encuentra dentro del rango mencionado.

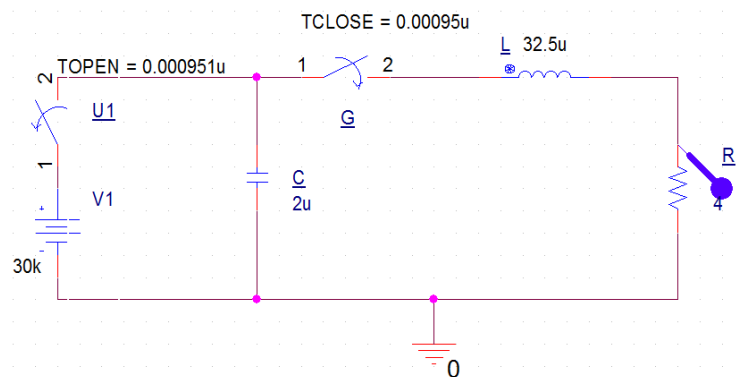
Tabla 5. Límites para los valores de resistencia **R**.

PARA ONDA DE IMPULSO DE CORRIENTE 8/20 us					
U _o (kV)	C (μF)	L (μH)	R (Ω)	Limite Menor R (Ω)	Limite Mayor R (Ω)
30,00	2	32,50	3,48	4,43	8,06
30,00	0,6	108,33	11,59	14,78	26,87
30,00	10	6,50	0,70	0,89	1,61
60,00	2	32,50	3,48	4,43	8,06

Para ninguna configuración distinta de capacitancias o tensión de entrada se obtiene un valor de resistencia que se encuentre dentro del intervalo de la ecuación 29, pues estos valores siempre resultan menores que el límite inferior establecido, lo cual explica por qué se obtiene una respuesta de onda sub-amortiguada pero no se logra mantener la amplitud pico de polaridad inversa por debajo del 20% requerido.

Se procede a experimentar utilizando un valor mayor y más cercano al Límite menor R como valor de la resistencia **R** del circuito en vez del obtenido mediante el despeje de la ecuación 24 para analizar si de esta forma se logra reducir la amplitud del pico de corriente de polaridad inversa, sin afectar drásticamente los tiempos **T₁** y **T₂** como para quedar por fuera de las tolerancias permitidas.

Figura 23. Esquema básico de circuito del GIC con **R** modificado.

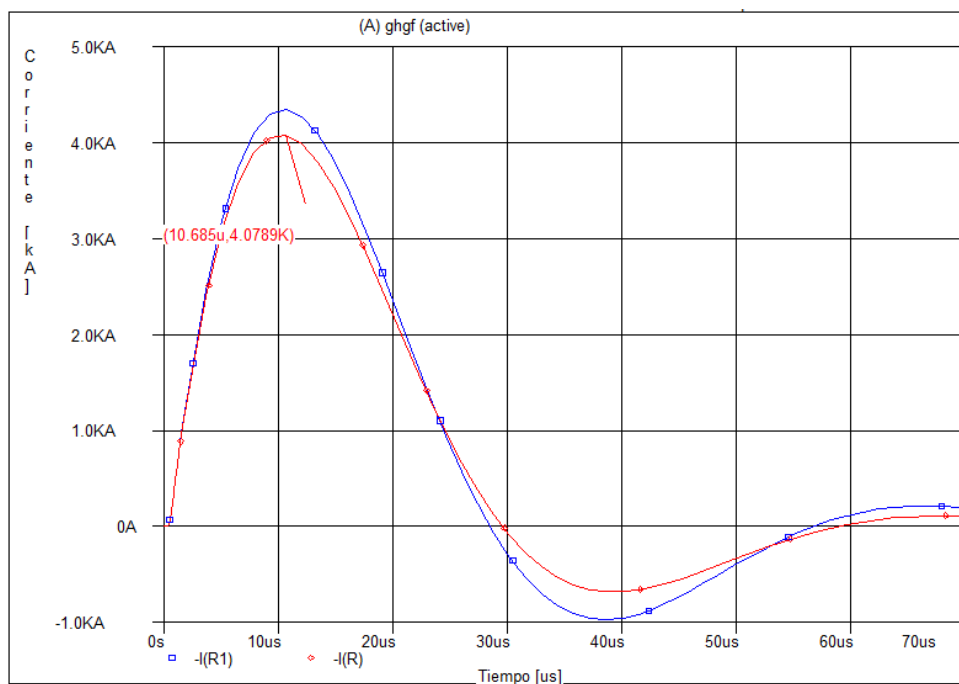


La Figura 24 presenta el resultado de la simulación del circuito con el nuevo valor de R (4Ω), el cual es ligeramente mayor al valor anterior y por ende más cercano al valor del **límite menor R** . De igual forma se conserva la onda obtenida previa a la modificación, esto con el objetivo de comparar ambos resultados y apreciar el cambio generado con el aumento de la R del sistema. Se puede apreciar una disminución considerable en la amplitud del pico de corriente en la nueva onda obtenida (color rojo) en comparación a la onda con el valor de R antiguo (color azul). De igual forma, se presenta una reducción en el valor de la amplitud del pico de polaridad inversa que era lo que se estaba buscando. Los resultados en detalle se presentan la Tabla 6 a continuación:

Tabla 6. Resultados obtenidos para el circuito de la Figura 23.

Comparación resultados de onda simulada						
U_o (kV)	R (Ω)	T_1 (μ s)	T_2 (μ s)	I_{maxT} (kA)	I_{maxR} (kA)	I_{min} (kA)
30	3,48	7,81	20,64	4,29	4,35	0,96
30	4	7,49	20,66	4,29	4,08	0,68

Figura 24. Ondas de impulso de corriente obtenidas para distintos valores de R .



Con esta nueva configuración se obtiene entonces una amplitud de pico de corriente de polaridad inversa (0,68 kA) menor al 20% del primer pico de amplitud

(0,82 kA) y, aunque se presenta una reducción notable en el tiempo de frente T_1 , este permanece dentro de la tolerancia permitida, al igual que el tiempo de cola T_2 .

Por supuesto es de esperarse que la magnitud del pico de corriente real no se encuentre próxima al valor teórico, pues la expresión que define este valor (ecuación 27) está relacionada directamente con el valor de resistencia que se alteró como método experimental. Se decide entonces proponer un cambio en la expresión, buscando un ajuste en base a los resultados obtenidos en la simulación del circuito de la Figura 23

$$I_m = \frac{30 \cdot 2}{x_{nuevo}} \quad x_{nuevo} = \frac{30 \cdot 2}{4.08} = 14.8 \approx 15 \quad (30)$$

$$I_m = \frac{V \cdot C}{15} \quad (31)$$

A continuación se procede con la simulación del segundo ejemplo de la Tabla 3, cuya onda de corriente obtenida se exhibe a continuación en la Figura 25

Figura 25. Ondas de corriente obtenidas para el segundo ejemplo de la Tabla 3.

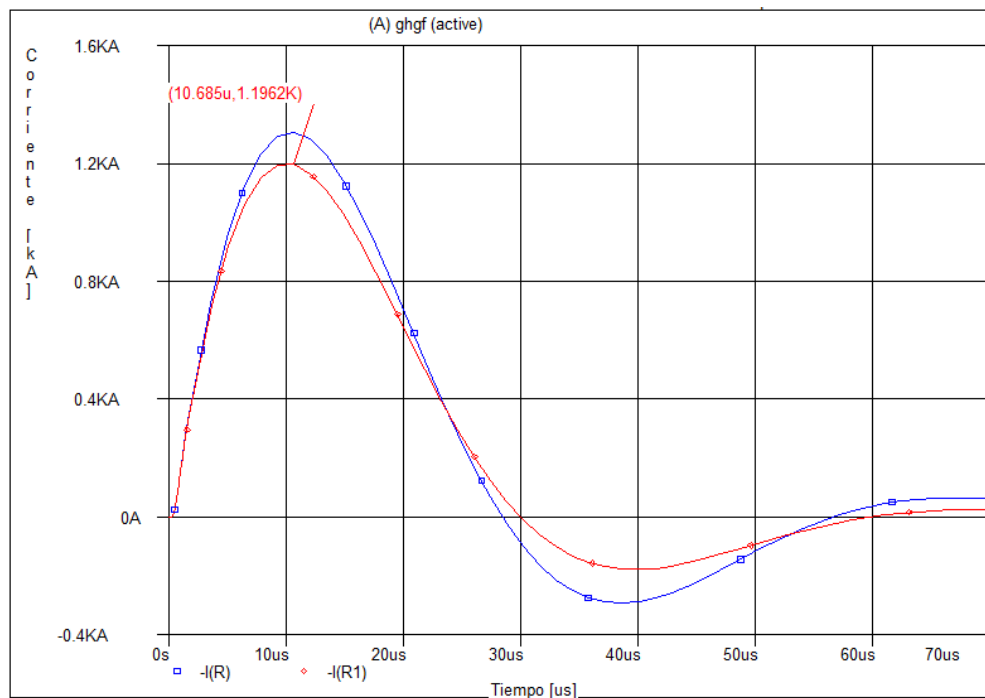


Tabla 7. Resultados obtenidos para el circuito del segundo ejemplo de la Tabla 3.

Resultados Onda Simulada								
U ₀ (kV)	C (μF)	L (μH)	R (Ω)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	I _{maxT} (kA)	I _{maxR} (kA)	I _{min} (kA)
30,00	0,6	108,33	11,59	7,81	20,60	1,29	1,31	0,29
30,00	0,6	108,33	14	7,33	20,65	1,20	1,19	0,18

En este caso se decide simular un circuito con el valor de **R** teórico (11,59 Ω) y otro con el valor experimental cercano al valor del **límite menor R** (14 Ω) y se obtienen como resultado dos ondas con parámetros **T₁** y **T₂** dentro de las tolerancias establecidas, pero la onda con **R** teórico (color azul) presenta, como era de esperarse, un pico de corriente de polaridad inversa mayor al 20% de **I_{maxR}** (0,29 kA > 0,26 kA), mientras que la onda con **R** experimental (color rojo) posee un pico de corriente de polaridad inversa dentro del límite previamente mencionado (0,18 kA < 0,24 kA), confirmando que el procedimiento experimental de acercar la **R** del sistema al **límite menor R** calculado permite ajustar ese pico de polaridad inversa mientras que mantiene los tiempos de frente y cola dentro de rango.

Se debe aclarar que el valor teórico del pico de corriente **I_{maxT}** expuesto en la Tabla 7 (1,20 kA) para el caso donde **R** = 14Ω se calculó como se propuso previamente en la ecuación 30 donde se tiene en cuenta la modificación al valor de **R** en el sistema, y se puede apreciar que la expresión se acerca mucho al valor obtenido en la simulación (1,19 kA) produciendo un porcentaje de diferencia del 0.83%.

Se procede a simular un último ejemplo de la Tabla 3 con el objetivo de afianzar la apropiación con el tema y demostrar la validez de las ecuaciones que describen el comportamiento de la onda de impulso de corriente de 8/20 μs

En este caso se decidió simular solamente el circuito con el valor de **R** experimental (4 Ω) pues se da por entendido que el valor teórico de esta variable que se obtenía mediante el despeje de la ecuación 24 (3,48 Ω) causa un sobrepaso en el valor del pico de polaridad inversa de más del 20% del pico de amplitud, independiente de la magnitud de los demás componentes del circuito.

La única diferencia entre este circuito y el de la Figura 23 es la magnitud de la tensión de entrada **U₀**, pues los demás componentes conservan sus mismos valores. Esta simulación se realiza para demostrar el efecto de la variación de **U₀** en el sistema, la cual no debería influir en tiempos de frente o cola de la onda, esto según las expresiones de la Tabla 2.

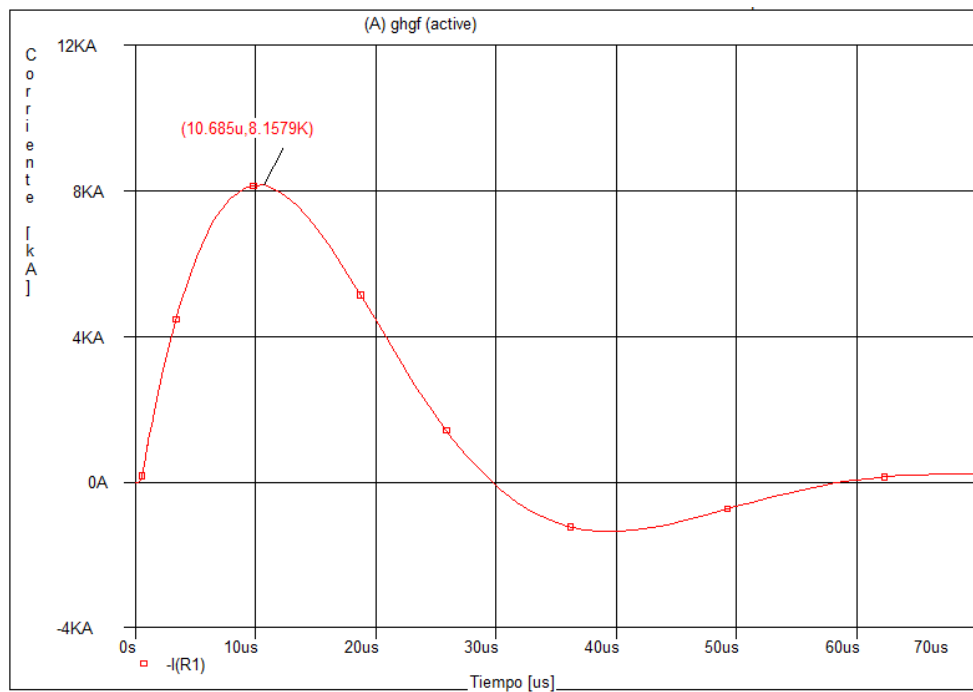
Tabla 8. Comparación de resultados obtenidos en las ondas de la Figura 23 y Figura 26.

Resultados Onda Simulada								
Uo (kV)	C (μF)	L (μH)	R (Ω)	T1 (μs)	T2 (μs)	I _{max} T (kA)	I _{max} R (kA)	I _{min} (kA)
30,00	2	32,5	4	7,49	20,66	4	4,08	0,68
60,00	2	32,5	4	7,49	20,66	8	8,16	1,36

Como se puede apreciar en la Tabla 8 de resultados, no se encuentra variación alguna en los tiempos de frente o cola de las dos ondas, y se genera un aumento del doble en la magnitud del pico de corriente cuando se eleva la tensión de entrada en la misma relación. El pico de corriente de polaridad inversa obtenido (1,36 kA) se mantiene dentro del parámetro establecido ($< 1,63$ kA).

Se puede concluir después de realizar las simulaciones pertinentes que fue posible generar una onda de impulso de corriente de 8/20 μs **estándar** haciendo uso de la teoría expuesta previamente, y de modificaciones menores a las cuales se llegó mediante la experimentación y ensayo

Figura 26. Onda de impulso de corriente obtenida para el último ejemplo de la Tabla 3.



Se pudo observar cómo el aumento en la resistencia **R** del sistema causa una disminución en la magnitud del impulso de corriente generado, como también en la magnitud del sobrepaso por debajo del eje x, además de disminuir el tiempo de frente **T1** que, mientras que **R** se mantenga cerca al **límite menor R** sin sobrepasarlo, no se verá por fuera de las tolerancias otorgadas por la norma. Finalmente, la expresión propuesta en la ecuación 30 para determinar teóricamente la magnitud del pico de corriente resultó ajustarse de manera eficaz al modificar el valor de la resistencia **R**, otorgando márgenes de diferencia muy pequeños con respecto a la magnitud obtenida por simulación, y será utilizada en los cálculos futuros necesarios.

Tabla 9. Resumen de resultados de simulaciones realizadas.

RESUMEN DE SIMULACIONES REALIZADAS								
Uo (kV)	C (μF)	L (μH)	R (Ω)	T1 (μs)	T2 (μs)	I _{maxT} (kA)	I _{maxR} (kA)	I _{min} (kA)
30,00	2	32,50	3,48	7,81	20,64	4,29	4,35	0,96
30,00	2	32,50	4	7,49	20,66	4,29	4,08	0,68
30,00	0,6	108,33	11,59	7,81	20,60	1,29	1,31	0,29
30,00	0,6	108,33	14	7,33	20,65	1,20	1,19	0,18
60,00	2	32,50	4	7,49	20,66	8	8,16	1,36

CAPÍTULO TRES

*“La ciencia será siempre una búsqueda, jamás un descubrimiento real. Es un viaje, nunca una llegada.” **Karl Raimund Popper.***

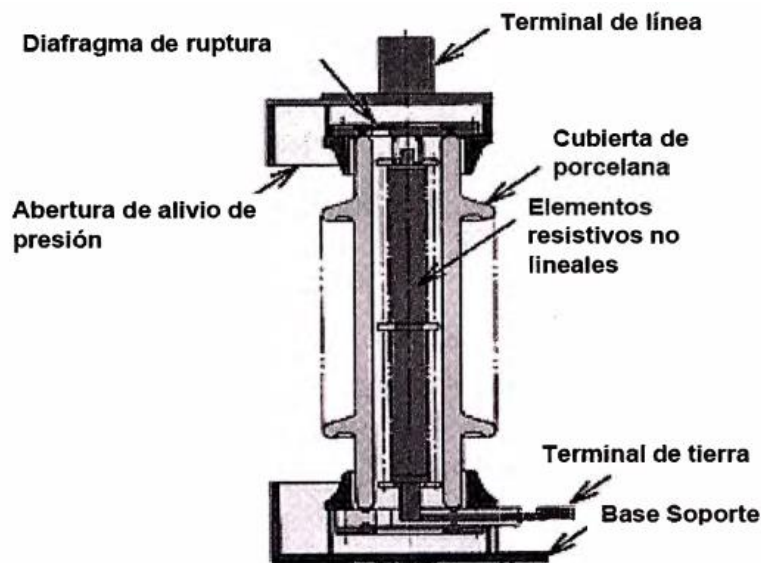
Siendo el objetivo general de este trabajo de grado el realizar pruebas en dispositivos de protección contra sobretensiones, resulta necesario profundizar en el tema y esclarecer de qué se tratan estas pruebas, y cómo se llevan a cabo. Los dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS) cumplen una función vital en el sistema eléctrico de potencia garantizando un resguardo efectivo a los elementos del mismo, limitando descargas atmosféricas o impulsos por maniobra a niveles seguros y trayendo de vuelta a la normalidad el sistema cuando los transitorios han sido suprimidos. Por seguridad, estos dispositivos de protección deben ser probados contra impulsos para garantizar que cumplan con su cometido una vez en funcionamiento.

El presente capítulo aborda las características generales y de funcionamiento de los DPS tipo Óxido-Metal (MO), así como su representación o modelado circuital y la simulación del mismo. De forma análoga, se repasará la normatividad que los rige, y las pruebas a las que se someten que requieran del uso de un GIC.

3. EL DISPOSITIVO DE PROTECCION CONTRA SOBRETENSIONES (DPS)

Los DPS o *surge arresters* en inglés, son dispositivos que limitan los distintos tipos de sobretensiones que aparecen en el sistema de potencia a causa de descargas atmosféricas o maniobras en la red. Existen dos tipos de DPS tipo válvula: los de **Carburo de Silicio (SiC)** los cuales poseen resistencias no lineales de carburo de silicio en serie con unos explosores metálicos, protegida por una envolvente de porcelana cilíndrica, y los de **Óxido de Metal (MO)**, los cuales están constituidos por discos de óxido de zinc (**ZnO**) y demás metales (Bi, Sb, Mn, Co, etc.) protegidos igualmente por una envolvente de porcelana o de material de goma silicona. Este dispositivo es conectado usualmente en paralelo a un elemento del sistema que se desee proteger, para derivar la corriente de impulso presente a tierra. Debido a que este dispositivo se comporta como un camino de baja resistencia en la presencia de sobretensiones, y en caso de normalidad en la red, su comportamiento cambia presentando una alta impedancia. Este comportamiento permite entender que la característica tensión corriente ($V-I$) del dispositivo es **No Lineal**. El DPS de **SiC** es una tecnología vieja y poco recomendable, pues la construcción de los tipo **MO** es mucho más simple y requiere menos piezas, aumentando su confiabilidad Su característica no lineal, además, es muy superior [14][13][15]

Figura 27. Estructura típica de un DPS de óxido de metal.

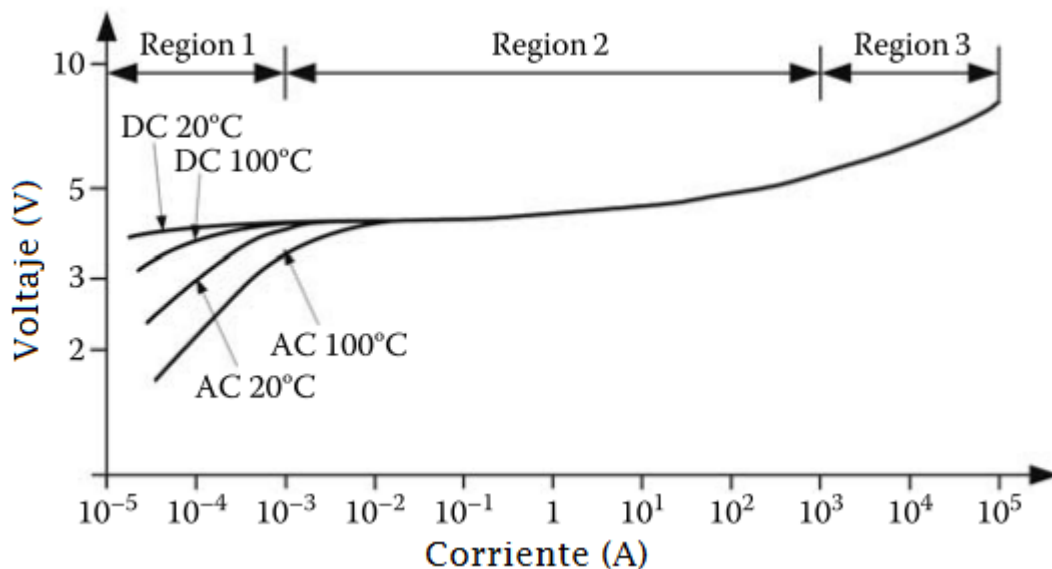


Fuente: Tomado de RODRIGUEZ, G. (2006). Protección contra sobretensiones impulsionales en sistemas de alta tensión

3.1 FUNCIONAMIENTO DEL DPS

El funcionamiento del dispositivo de protección contra sobretensiones está definido por su característica de tensión versus corriente ($V-I$) la cual puede ser dividida en tres regiones, tal como se aprecia en la Figura 28. En la región 1 se encuentran los niveles de corriente menores a 1mA y su comportamiento es principalmente capacitivo. La región 2 comprende los valores de corriente entre 1 mA y aproximadamente 2000 A, donde el comportamiento de la corriente es del tipo resistiva. En esta región la energía de la sobretensión es drenada hacia tierra en forma de corriente, manteniendo la tensión en un valor prácticamente constante y por debajo del nivel de aislamiento del elemento que protege. En la región 3 se agrupa los altos niveles de corriente definiendo el intervalo desde 2 kA hasta 100 kA, donde se puede apreciar que la relación de la tensión y corriente se empieza a comportar de manera lineal, por lo que el varistor de óxido de metal se convierte en una resistencia pura, sin embargo se presenta inestabilidad térmica lo que puede causar la destrucción del DPS. [14], [16]

Figura 28. Característica $V-I$ típica de DPS tipo MO.



Fuente: Tomado y editado de MARTINEZ-VELASCO, J. (2010). *Power System Transients Parameter Determination*

La característica no lineal $V-I$ del DPS (**SiC** ó **ZnO**) depende directamente de la forma de onda de corriente que se aplique al DPS, donde a mayores tiempos de frente, mayores picos de tensión resultan. Esta característica está dada por la expresión:

$$I = k \cdot V^{\alpha} \quad (32)$$

Donde:

- I: Corriente de descarga
- V: Tensión Residual
- k: Parámetro característico del material que depende de las dimensiones del DPS y la longitud de los discos de óxido.
- α : Es el coeficiente de No Linealidad que depende directamente del material del DPS. En los antiguos DPS de carburo de silicio (**SiC**) se encontraba entre 2 y 6. En los DPS tipo **ZnO** varía entre 30 y 50, y a mayor valor de α , mayor es la protección.[16]

3.1.1 Parámetros de funcionamiento del DPS.

Los siguientes parámetros de funcionamiento están definidos por la IEC 60099-4

- **Tensión nominal (Rated Voltage) U_r**

Es la tensión eficaz que debe resistir un DPS por al menos 10 segundos después de ser precalentado a 60°C y sometido a descargas de corriente como lo define la norma. Por tanto, la capacidad de sobretensión temporal (**TOV**) debe ser el mínimo valor de U_r . La tensión nominal se usa como un parámetro de referencia para la especificación de otras características de operación.

- **Tensión de funcionamiento continuo (Continuous operating voltage) U_c**

Es la tensión eficaz máxima soportada por un DPS de manera permanente que garantiza un correcto funcionamiento frente a ondas de corriente tipo impulso que puedan aparecer.

- **Corriente de descarga nominal (Nominal discharge current) I_n**

Es el valor pico de un impulso de corriente tipo rayo de 8/20 μ s que se usa para clasificar un descargador de sobretensiones. Los valores normalizados de la corriente nominal de descarga son 1,5 kA, 2,5 kA, 5 kA, 10 kA y 20 kA.

- **Corriente en régimen continuo (Continuous current of an arrester) I_c**

Es la corriente que fluye a través del DPS a tensión de operación continua U_c . Esta corriente es predominantemente capacitiva y es expresada generalmente como un valor pico.

- **Capacidad de absorción de energía (Thermal energy rating) W_{th}**

Es la máxima cantidad de energía capaz de ser absorbida por el DPS por unidad de tensión asignada (kJ / kV_r). Se debe multiplicar este factor por la tensión asignada del DPS U_r para determinar la energía máxima que es capaz de soportar.

- **Tensión residual (Residual Voltage) U_{res}**

Es la tensión que aparece entre los terminales de un DPS durante el paso de una corriente de descarga a través del mismo. Esta tensión depende de la forma de onda y magnitud de dicha corriente de descarga y es expresada como un valor pico.

3.2 NORMATIVIDAD VIGENTE DE LOS DPS

La normatividad a la que se acudió en este trabajo de grado para estudiar sobre pruebas realizadas en DPS fue la siguiente.

- ***International Standard IEC 60099-4: Surge Arresters- Part 4: Metal-Oxide Surge Arresters Without Gaps for A.C Systems***, en la cual se presentan los mínimos requerimientos para realizar pruebas en este tipo de DPS con tensiones del sistema $U_s > 1 \text{ kV}$. [17]

A continuación se describirán las pruebas que, según las normas referenciadas, requieran la generación y aplicación de un impulso de corriente de $8/20 \mu\text{s}$, esto con el objetivo de demostrar la importancia de poseer las herramientas para generar este impulso en un laboratorio de alta tensión como el de la Universidad del Valle.

3.2.1 Ensayos de Tensión Residual.

Estas pruebas tienen como objetivo obtener las máximas tensiones residuales para cada descargador de sobretensiones para todas las corrientes y formas de onda especificadas y compararlas con las especificadas por el fabricante.

“La tensión máxima residual de un descargador de sobretensiones determinado diseñado para cualquier corriente y forma de onda se calcula de la tensión residual de las secciones ensayadas durante los ensayos tipo, multiplicada por un factor de escala específico. Este factor de escala es igual a la relación de la tensión residual

máxima declarada, como se verificó durante los ensayos de rutina, con la tensión residual medida de las secciones a la misma corriente y forma de onda.” [18]

3.2.1.1 Ensayo de tensión residual de impulso tipo rayo.

Se debe aplicar un impulso de corriente tipo rayo a cada una de las tres muestras que se deben ensayar por norma, con valores pico de aproximadamente 0.5, 1 y 2 veces la corriente de descarga nominal I_n del DPS. El tiempo de frente de la onda T_1 aplicada debe estar entre 7 μ s y 9 μ s, mientras que el tiempo de cola T_2 puede tener cualquier tolerancia.

Los valores máximos de las tensiones residuales determinadas se deben trazar en una curva de tensión residual U_{res} vs corriente de descarga aplicada. La tensión residual leída en esta curva correspondiente a la corriente de descarga nominal I_n se define entonces como el **nivel de protección de impulsos tipo rayo del descargador de sobretensiones**. [17]

Se exhiben Valores típicos de tensiones residuales máximas en DPS de entre 1.5 kA y 10 kA al final de este documento. (Véase ANEXO B)

3.2.2 Ensayo para verificar la rata de transferencia de carga repetitiva Q_{rs} .

El objetivo de esta prueba es verificar la rata de transferencia de carga repetitiva Q_{rs} de un descargador de sobretensiones. Esta característica se define como el estrés provocado por un impulso de corriente que pueda ser soportado 20 veces por los resistores de óxido de metal (**MO**) de un DPS sin mostrar daños mecánicos o eléctricos. Un estrés provocado por un impulso de corriente es entonces considerado como la representación de la transferencia de carga que pueda ocurrir bajo condiciones reales del sistema.

Esta prueba se le realiza a resistores individuales, a un valor de carga en el rango de entre 1.1 y 1.2 veces el valor designado de Q_{rs} , el cual debe ser seleccionado o asignado a cada DPS a partir de la Tabla 10. Se asume entonces al realizar este procedimiento que el desempeño de los resistores **MO** individuales puede ser referido al del DPS completo construido con estos resistores en específico.

Un impulso de corriente tipo rayo de 8/20 μ s es necesario en la realización de la prueba a resistores **MO** de DPS de clase de distribución, por ende no es necesario este tipo de onda para otros tipos descargadores.[17]

Tabla 10. Valores nominales de la rata de transferencia de carga repetitiva Q_{rs} .

Valores nominales de Q_{rs}	
De 0,1 C a 1,2 C	En pasos de 0,1 C
De 1,2 C a 4,4 C	En pasos de 0,4 C
De 4,4 C a 10 C	En pasos de 0,8 C
De 10 C a 20 C	En pasos de 2 C
De 20 C en adelante	En pasos de 4 C
<i>Fuente: Tomado y editado de IEC. (2014). IEC 60099-4. Surge Arresters - Part 4: Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c systems</i>	

Para el impulso tipo rayo de 8/20 μ s se puede calcular la amplitud de corriente a aplicar para generar la carga asignada Q_{rs} según el siguiente factor:

$$I = 62 * Q_{rs} \text{ (kA)} \quad (33)$$

Esta amplitud es informativa y de valor aproximado. La amplitud de la onda de impulso de corriente real necesaria para producir la carga puede variar con respecto a este resultado.

Tabla 11. Procedimiento a efectuar en la prueba de carga repetitiva Q_{rs} .

Pruebas iniciales
<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo de tensión residual a corriente de descarga nominal • Ensayo de tensión de referencia a corriente de referencia especificada
Aplicación de 1.1 veces Q_{rs}
<ul style="list-style-type: none"> • 1^{era} secuencia: 20 impulsos por muestra (10 muestras) • Si no más de 1 muestra falla durante la primera secuencia: Ensayo terminado • Si no más de dos muestras fallan durante la primera secuencia: Se realiza una segunda secuencia con 10 muestras, 20 impulsos por muestra. • Si más de dos muestras fallan en la primera secuencia o cualquier muestra falla en la segunda: Ensayo fallido.
Evaluación del ensayo: revisar...
<ul style="list-style-type: none"> • Que no haya daño mecánico en inspección visual • Que no haya un cambio en la tensión de referencia dentro de $\pm 5\%$ • Que no haya cambio en la tensión residual a corriente de descarga nominal dentro de $\pm 5\%$

Tabla 11. (Continuación)

- Que soporte un impulso final de corriente de 8/20 μ s de al menos 0.5 kA / cm² de densidad de pico de corriente, o dos veces I_n , lo que sea más bajo.

Fuente: Tomado y editado de IEC. (2014). IEC 60099-4. Surge Arresters - Part 4: Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c systems

Nota: Los impulsos deben aplicarse en 10 grupos de 2 impulsos cada uno, esperando entre 50 a 60 segundos entre impulsos, y el tiempo suficiente para que se enfríe la muestra a temperatura ambiente entre grupos.

3.3 MODELO CIRCUITAL PARA TRANSITORIOS RÁPIDOS

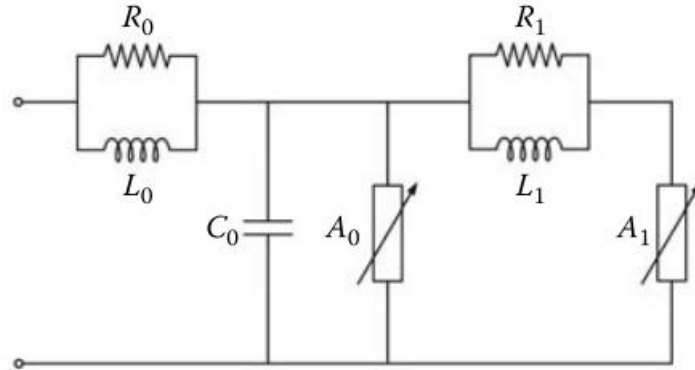
El comportamiento dinámico de los DPS fue descrito por primera vez alrededor de 1970 [19]. Desde dicho tiempo han surgido múltiples modelos que simulan el comportamiento del DPS y su dependencia a la frecuencia. En resumen, todos los modelos se basan en la utilización de una resistencia no lineal para reproducir el comportamiento de la característica $V-I$ de los materiales del varistor de óxido de metal, y una inductancia para agregar la dependencia a la frecuencia que representa el DPS.

Un modelo único de DPS para evaluar todas las posibles perturbaciones de tipo transitorio en los sistemas de potencia sería demasiado complicado e ineficiente, pues requeriría tantos recursos de simulación que su implementación sería impráctica. Por consiguiente, una elección adecuada del modelo para el DPS para determinado tipo de sobretensión transitoria resulta esencial. Para sobrecorrientes con tiempos de frente menores a 10 μ s, la tensión residual en terminales del DPS se incrementa a medida que el tiempo de frente de la corriente de descarga disminuye, y el valor pico de U_{res} se alcanza antes que lo haga el pico de la corriente de descarga. Un incremento del 6% en el valor de la tensión residual puede ser alcanzado cuando el tiempo de frente de la onda de corriente se reduce de 8 a 1.3 μ s. Esto permite comprender que la tensión en bornes del DPS no se rige solo en función del valor de la corriente de descarga, también lo hace en función de la rata de crecimiento de la onda. Estas características, conocidas como comportamiento dependiente de frecuencia (**Frequency-dependent behavior**) requieren de un modelo más sofisticado que una simple resistencia no lineal estática. [20]

En el presente trabajo de grado se procederá a estudiar el modelo de DPS propuesto por Daniel W. Durbak y posteriormente adoptado por la *IEEE*. [21][22]

3.3.1 Modelo de DPS de la IEEE.

Figura 29. Modelo de DPS adoptado por la IEEE



Fuente: Tomado de DURBAK, D. MARTINEZ, J. (2005). *Parameter Determination for Modeling Systems Transients — Part V: Surge Arresters*.

Este modelo comprende dos resistencias no lineales independientes del tiempo (A_0 y A_1), un par de inductores lineales (L_0 y L_1) en paralelo a un par de resistencias lineales (R_0 y R_1) y un capacitor C . Para sobretensiones de bajas frecuencias, la impedancia del filtro pasa bajos que forman L_1 y R_1 es muy baja por lo que A_0 y A_1 quedan prácticamente en paralelo. Sin embargo, en sobretensiones de alta frecuencia es todo lo contrario, y la corriente de descarga se ve distribuida entre las dos ramas no lineales.

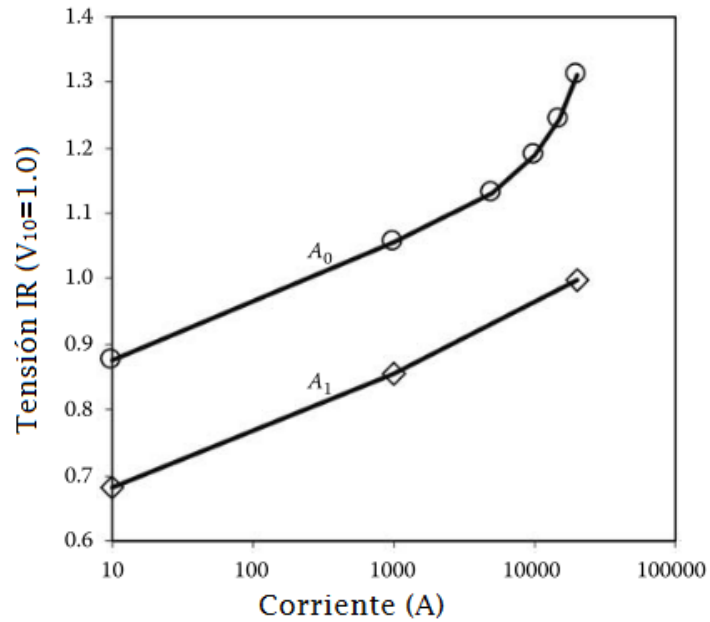
Tabla 12. Característica V-I para A_0 y A_1 en Figura 30.

Corriente (kA)	Tensión (por unidad de V_{10})	
	A_0	A_1
0.01	0.875	0.681
1	1.056	0.856
5	1.131	
10	1.188	
15	1.244	
20	1.313	1.000

Fuente: Tomado de DURBAK, D. MARTINEZ, J. (2005). *Parameter Determination for Modeling Systems Transients — Part V: Surge Arresters*.

“Los valores presentados en la Tabla 12 han sido escalados con respecto a los presentados en [22], al usar el factor 1.6 propuesto en la referencia original” [21]

Figura 30. Característica V-I para las resistencias no lineales A_0 y A_1 .



Fuente: Tomado de DURBAK, D. MARTINEZ, J. (2005). *Parameter Determination for Modeling Systems Transients — Part V: Surge Arresters*.

Tabla 13. Cálculo de los parámetros lineales del modelo de DPS de la IEEE.

Cálculo de Parámetros Lineales			
$L_0 = 0.2 \cdot \frac{d}{n} (\mu H)$	(34)	$L_1 = 15 \cdot \frac{d}{n} (\mu H)$	(35)
$R_0 = 100 \cdot \frac{d}{n} (\Omega)$	(36)	$R_1 = 65 \cdot \frac{d}{n} (\Omega)$	(37)
$C = 100 \cdot \frac{n}{d} (pF)$			(38)

Fuente: Tomado y editado de MARTINEZ-VELASCO, J. (2010). *Power System Transients Parameter Determination*

Donde:

- d: Altura del DPS en metros (m)
- n: Número de columnas de discos de óxido de metal (**MO**) en paralelo.

La Figura 30 representa la característica tensión-corriente ($V-I$) de A_0 y A_1 donde los valores de tensión se encuentran en por unidad (pu) de V_{10} , el cual es la tensión de descarga para un impulso de corriente 8/20 μs de 10 kA. Además, en la Tabla 13 se especifican las expresiones para calcular los parámetros lineales del modelo.

La inductancia L_0 representa en el modelo a la inductancia asociada con los campos magnéticos en los alrededores inmediatos del DPS, y la resistencia R_0 tiene como función estabilizar las integraciones numéricas en la simulación computacional. Finalmente, la capacitancia C en el modelo representa la capacitancia entre terminales del DPS. [21]

Estas fórmulas no siempre otorgan los mejores parámetros, pero proveen un buen punto de partida para hallarlos.

Se establece entonces un procedimiento para calcular o elegir los parámetros de este modelo dependiente de frecuencia:

1. Calcular los valores iniciales de los parámetros lineales (R_0 , R_1 , L_0 , L_1 , C) a partir de las ecuaciones mostradas en la Tabla 13, y derivar la característica no lineal $V-I$ de A_0 y A_1 .
2. Ajustar los valores de por unidad en las curvas de la característica no lineal $V-I$ de A_0 y A_1 . para obtener una buena similitud con respecto a las tensión de descarga asociada con las corrientes de descarga de impulso dadas por el fabricante. Este valor de tensión se acota como V_{ss} .
3. Ajustar el valor de L_1 para obtener una buena similitud con la tensión V_{10} que representa la tensión de descarga para una corriente de descarga tipo impulso de 8/20 μs .

Este modelo fue adoptado por la *IEEE* debido a su capacidad de entregar resultados satisfactorios para corrientes de descarga con un rango de tiempo de frente entre 0.5 μs y 45 μs . [21]

3.4 SIMULACIÓN EN EL SOFTWARE ATP DEL MODELO DE DPS

Se recurrió al software de simulación Electromagnetic Transients Program (EMTP) en su versión Alternative Transients Program (ATP) para realizar la simulación del modelo del DPS adoptado por la *IEEE*, y así comprobar el funcionamiento del mismo el cual ha sido explicado previamente en este trabajo de grado. La elección por este software se atribuye a la comodidad en el manejo de elementos no lineales como el varistor de óxido de metal (MOV) que viene incluido en el

programa, en comparación al software OrCAD PSpice donde se venía trabajando previamente, y donde resulta mucho más compleja la programación del modelo circuital del DPS estudiado.

Como objeto de simulación se elige el descargador de sobretensiones Tipo **ZnO** modelo PEXLIM P96 de la marca ABB, cuyas características nominales e información de protección se anexan en la Tabla 14 a continuación.

Tabla 14. Información de fábrica del Descargador PEXLIM P96 de ABB

PEXLIM P96- ABB			
Tensión Máxima del Sistema U_m	123	kV	
Tensión Nominal U_r	96	kV	
Tensión de Funcionamiento Continuo U_c	77	kV	
Corriente de Descarga Nominal I_n	20	kA	
Clase de Descarga de Línea (IEC)	Clase 4	-	
Altura d	1,080	m	
Número de Columnas en Paralelo n	1	-	
Tensión Residual- Distintas Ondas de Corriente de Descarga			
30/60 μs	1 kA	188	kV
	2 kA	194	kV
	3 kA	199	kV
8/20 μs	5 kA	208	kV
	10 kA	219	kV
	20 kA	240	kV
	40 kA	263	kV



Fuente: Tomado y editado de ABB. (2007). Zinc-Oxide Surge Arrester PEXLIM P Guaranteed protective data. [23]

Con los valores provenientes del fabricante es posible entonces empezar a construir el modelo circuital que será simulado en el software ATP rigiéndose por la teoría evaluada previamente en este trabajo de grado. Se calcularán los parámetros lineales del sistema que dependen estrictamente de la configuración física del descargador, se elaborará la relación tensión corriente (V-I) del modelo para los elementos no lineales A_0 y A_1 y se procederá a analizar la tensión residual obtenida para distintos niveles de corriente aplicados. [20][24]

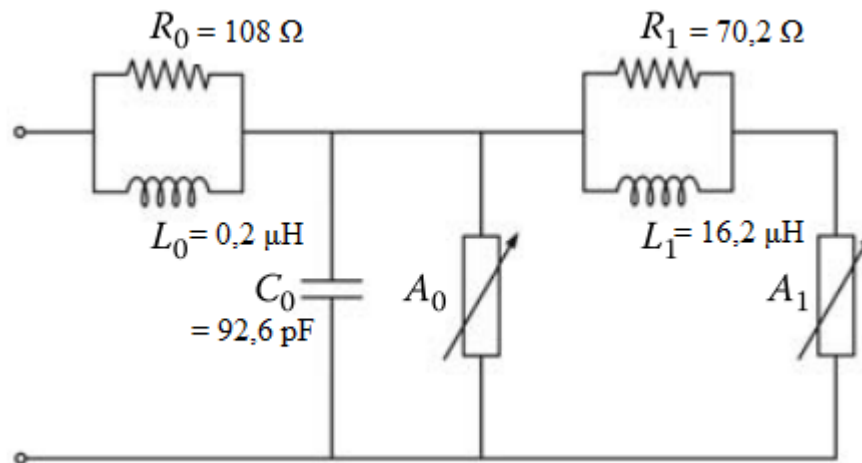
3.4.1 Cálculo de Parámetros Lineales del Modelo.

Se procede a calcular los parámetros lineales del modelo a implementar según las expresiones de la Tabla 13.

Tabla 15. Cálculo de parámetros lineales del modelo a implementar.

$L_0 = 0.2 \cdot \frac{1,080}{1} = 0,2(\mu H)$	(39)	$L_1 = 15 \cdot \frac{1,080}{1} = 16,2(\mu H)$	(40)
$R_0 = 100 \cdot \frac{1,080}{1} = 108(\Omega)$	(41)	$R_1 = 65 \cdot \frac{1,080}{1} = 70,2(\Omega)$	(42)
$C = 100 \cdot \frac{1}{1,080} = 92,6(pF)$			(43)

Figura 31. Parámetros calculados a integrar al modelo del DPS.



3.4.2 Obtención de la Característica No Lineal (V-I) del Modelo.

La selección de las tensiones para la característica no lineal de los parámetros A_0 y A_1 del modelo se realizó según lo demostrado en la Tabla 12 donde se establecen los puntos característicos de la relación tensión corriente (V-I) típica en los DPS. Los valores de tensión en dicha tabla se encuentran en por unidad (pu) de la tensión V_{10} , la cual se define como la tensión en bornes del DPS al aplicar un impulso de corriente de 8/20 μ s, con amplitud de 10 kA.

Para hallar la tensión en kV correspondiente al DPS en cuestión se debe aplicar la siguiente formula.

$$Tensión \text{ (kV)} = Tensión \text{ en pu} * V_{10} \quad (44)$$

Se procede a hallar la característica no lineal V-I para el DPS en cuestión:

Tabla 16. Característica tensión corriente (V-I) para A_0 y A_1 para el DPS en cuestión.

Corriente (kA)	Tensión (por unidad de V_{10})		Tensión (kV)	
	A_0	A_1	A_0	A_1
0.01	0.875	0.681	191625,00	149139,00
1	1.056	0.856	231264,00	187464,00
5	1.131		247689,00	
10	1.188		260172,00	
15	1.244		272436,00	
20	1.313	1.000	287547,00	219000,00

3.4.3 Implementación del Modelo en ATP.

El circuito a implementar en el software ATP consiste en una fuente Heidler la cual generará el impulso de corriente de 8/20 μ s que se aplicará en bornes del modelo IEEE del DPS. Este modelo se encuentra estructurado en un bloque llamado ZNO92_IEEE, donde se programó de tal manera que calcule automáticamente los parámetros lineales necesarios para el modelado, requiriendo solamente la altura d y el número de columnas en paralelo n del DPS a simular. De igual manera, el bloque es capaz de crear la característica tensión corriente (V-I) del descargador a simular al solicitar el valor de la tensión de descarga V_{10} , tal como se llevó a cabo en la Tabla 16.

Figura 32. Modelo del DPS implementado en el software ATP.

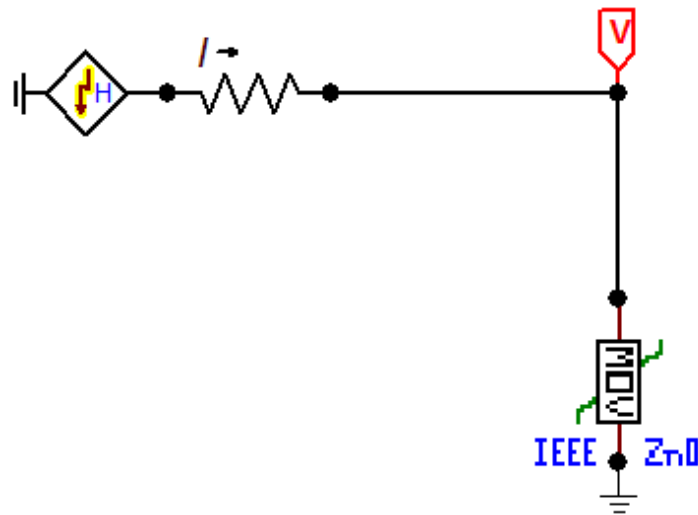


Figura 33. Parámetros de entrada del modelo del DPS, bloque ZNO92_IEEE.

User specified: ZNO92_IEEE

Attributes					
DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
VOLREF		219000	NODINT	1	XX0003
ALTUES		1	NODOUT	1	
NUCOLP		1			

Donde:

- VOLREF: Tensión de descarga V_{10} del descargador a simular.
- ALTUES: Altura estimada del descargador en metros (M)
- NUCOLP: Número de columnas en paralelo del descargador.

A continuación se presentan los resultados al aplicar la onda de impulso de corriente tipo rayo en bornes del modelo del DPS.

En la Figura 35 se puede apreciar la tensión residual obtenida en bornes del DPS modelado (Azul) al aplicar un impulso de corriente de 10 kA, 8/20 μ s (Rojo). Se obtiene una diferencia entre los valores de catálogo y los obtenidos en la simulación del 5,85 %.

Figura 34. Onda de corriente tipo rayo 8/20 μ s que se aplicará al modelo del DPS.

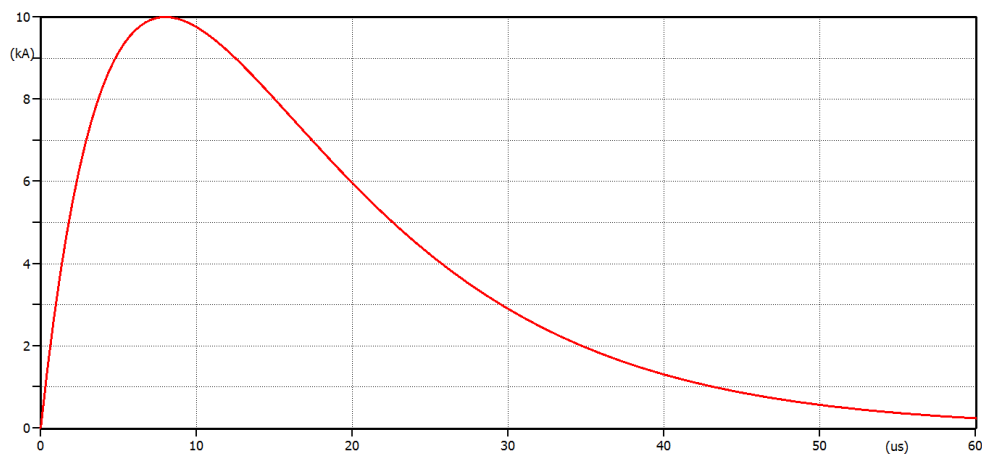


Figura 35. Tensión residual y Corriente de impulso en bornes del DPS simulado.

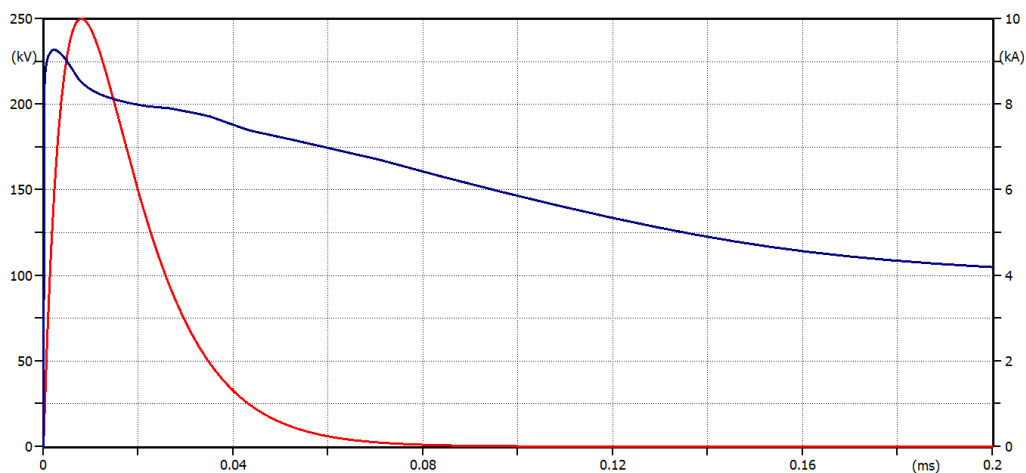
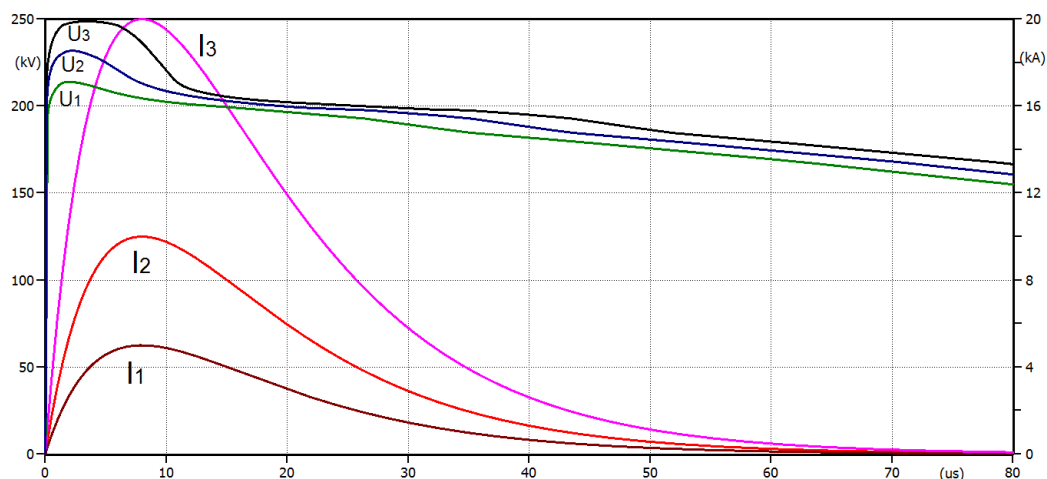


Tabla 17. Resultado de tensión residual obtenido en el modelo de DPS simulado.

Tensión Residual en DPS (Onda de Corriente 10 kA, 8/20 μ s)		
Simulación ATP	Información de catalogo	Diferencia
[kV]		[%]
231,84	219,00	5,85

Figura 36. Tensiones residuales en bornes del DPS al aplicar ondas de impulso corriente de distintos valores pico.



Se procedió entonces a aplicar tres ondas de impulso de corriente de distintos valores pico para observar el comportamiento del DPS simulado frente a ellas, y para comparar estos resultados con lo expresados en el catálogo. En la Tabla 18 se adjuntan los resultados obtenidos.

Se puede concluir que el modelo *IEEE* del DPS simulado en el software ATP se comporta acorde a la teoría estudiada previamente en este trabajo de grado. El pico de tensión residual ocurre primero que el pico del impulso de corriente, y los resultados obtenidos no superan errores mayores al 6% en comparación a lo especificado por el fabricante. Se da un cierre pues a este capítulo habiendo logrado simular el comportamiento de un descargador de sobretensiones satisfactoriamente, y habiendo comprendido la metodología para la obtención de la tensión residual en el mismo, tal como se hará en los ensayos reales.

Tabla 18. Resultados de tensiones residuales a distintos picos de corriente aplicados.

Tensión Residual en DPS			
Pico de corriente	Simulación ATP	Información de catalogo	Diferencia
[kA]	[kV]		[%]
5	213,92	208,00	2,85
10	231,84	219,00	5,85
20	248,70	240,00	3,62

CAPÍTULO CUATRO

*“El misterio es la cosa más bonita que podemos experimentar. Es la fuente de todo arte y ciencia verdadera” **Albert Einstein.***

Habiendo culminado la fase de apropiación con los temas del Generador de Impulso de Voltaje, Generador de Impulso de Corriente y los modelos representativos del DPS a través de teoría y simulación, es entonces posible abordar el objetivo principal del trabajo de grado y explicar cómo llevar a cabo la transformación del GIV presente en LAT de la Universidad del Valle en un GIC estándar.

En este capítulo se expondrán aquellos requerimientos necesarios para llevar a cabo la transformación mencionada en el LAT, se mostrarán los límites operacionales del GIC a implementar y se demostrará el procedimiento teórico para la generación de la onda de impulso de corriente estándar en el LAT de la Universidad del Valle.

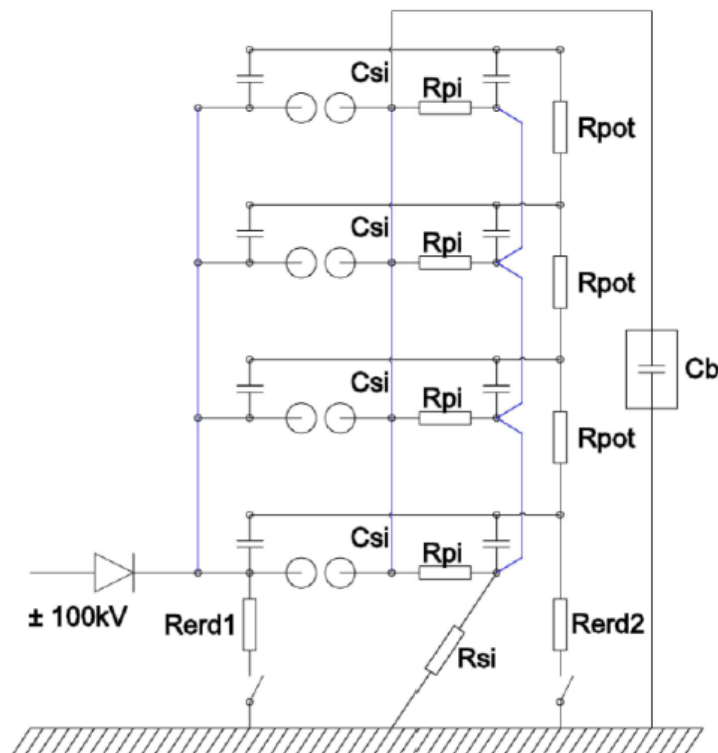
4. REQUERIMIENTOS PARA LA TRANSFORMACIÓN DEL GIV DEL LAT, EN UN GIC

En los capítulos anteriores se establecieron las evidencias del proceso de apropiación llevado a cabo con el generador de impulsos de tensión del LAT, la teoría básica de funcionamiento del generador de impulsos de corriente y su similitud con el circuito elemental del GIV, y la normatividad relacionada con las pruebas en DPS que, en conjunto, soportan la justificación de este trabajo grado. A continuación serán expuestos entonces los requerimientos necesarios para lograr la conversión del generador de impulsos de tensión existente en el LAT de la Universidad del Valle en un generador de impulsos de corriente que pueda ser utilizado como herramienta para el desarrollo de pruebas en dispositivos de protección contra sobretensiones.

4.1 CONFIGURACIÓN DEL GIC A IMPLEMENTAR

4.1.1 Punto de Partida para Determinar el Circuito del GIC.

Figura 37. Acoplamiento en paralelo del GIV del LAT.

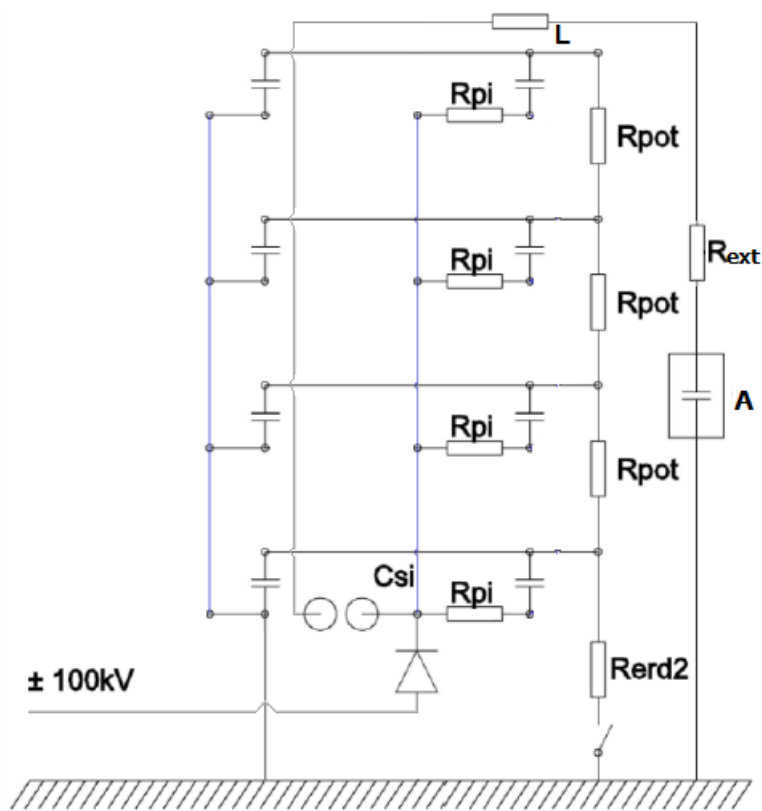


Fuente: Tomado de SILVA, A. Diseño del montaje de un generador de impulso de 1100 kV.

Mediante el estudio de las posibles conexiones del GIV de LAT, buscando una similitud o punto de partida para formar un GIC con el cual sea posible realizar pruebas a DPS, se analizó a profundidad el acoplamiento en paralelo en el cual se puede apreciar como todas las etapas se encuentran conectadas en paralelo, y por ende, la tensión máxima del impulso de tensión que se puede generar es igual a la tensión de carga por etapa. [6]

En la Figura 38 a continuación, se demuestran los cambios necesarios sobre el arreglo en paralelo del GIV para su conversión en un circuito generador de impulsos de corriente.

Figura 38. Conexión propuesta para el circuito del GIC, editado sobre la Figura 37.

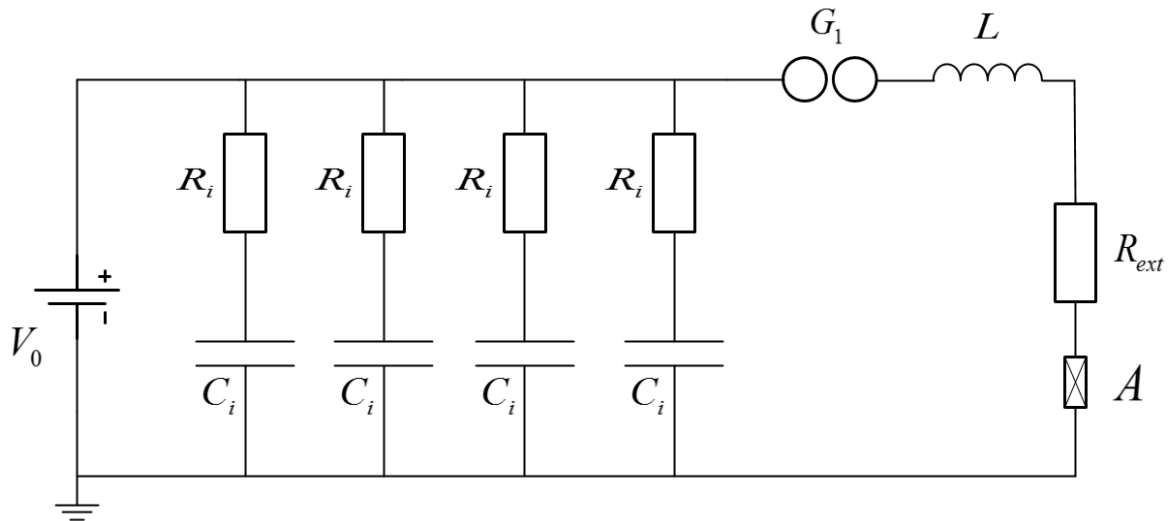


4.1.2 Circuito para el GIC a implementar sobre el GIV del LAT

La configuración de la Figura 39 a continuación fue propuesta mediante el estudio de las conexiones disponibles para el GIV del LAT, para así tomar la mejor decisión teniendo en cuenta lo presente en la actualidad, y lo que se desea obtener con ello. El acoplamiento en paralelo de dicho generador, de entre todas

las posibles configuraciones, se mostró muy cercano a lo que se deseaba obtener, y en base a su esquema de conexiones exhibido en la Figura 37, se procedió a analizar las posibilidades de una configuración para el GIC que satisficiera los parámetros previamente especificados.

Figura 39. Circuito elemental del GIC a implementar sobre el GIV existente.



Fuente: Elaboración propia.

El esquema presentado en la Figura 39 exhibe la configuración o arreglo de los componentes RLC del circuito generador de impulsos de corriente tipo rayo que mejor se ajusta a la configuración del GIV del LAT, facilitando las conexiones entre elementos y aprovechando al máximo los componentes disponibles para llegar al resultado final. Este arreglo se propone en base a los resultados obtenidos en [8]. Resulta ser la configuración que mejor se ajusta al GIV del LAT debido a que las otras opciones se basan en el uso de múltiples bobinas **L**, lo cual sería económicamente no viable, pudiendo obtener el mismo resultado con la utilización de múltiples capacitores **C** que ya se encuentran disponibles en el GIV del LAT.

Lo que se propone es un arreglo en paralelo de capacitores en serie con resistencias cuya equivalencia concuerde con los valores teóricos de **R** y **C** del circuito básico expuesto en la Figura 16, calculados según las expresiones de la Tabla 2 que garantizan unos tiempos de frente y cola dentro de las tolerancias permitidas por la norma. Cada rama de capacitor en serie con resistencia equivale a una etapa del GIV, por lo que el número máximo posible de ramas en paralelo será de 11, pues este es el número máximo de etapas que el GIV posee.

Los valores de **C** y **R** en una rama deben ser iguales para todas las demás ramas a implementar en el circuito, esto debido a que se debe garantizar que todas las etapas del Generador sean equipotenciales, o se presentará circulación de corrientes parásitas a través de las etapas que afectarán la onda a obtener. Esto significa que no es posible variar los valores de capacitancia o resistencia por etapa, y esto representa una condición inicial importante a tener cuenta para la determinación de las características de los demás componentes del circuito. Una resistencia externa **R_{ext}** conectada afuera de las ramas en paralelo, que supla la resistencia extra necesaria del circuito, surge como solución a dicho obstáculo.

Finalmente, la implementación de una bobina **L** después del arreglo **RC** concluye la configuración del circuito propuesto, considerando de igual manera el objeto de prueba donde se llevará a cabo la medición del impulso de corriente generado.

4.1.2.1 Resistencias del circuito a implementar. Se debe apreciar en la Figura 37 que por cada etapa del generador es posible lograr una rama serie de los capacitores con las resistencias paralelo **R_{pi}**, las cuales podrían bien ser reemplazadas por las resistencias serie **R_{si}** en caso de necesitar otros valores de resistencia en paralelo para lograr un valor equivalente específico, esto gracias a la característica modular del GIV del LAT de la cual ya se ha hablado previamente en este trabajo de grado.

El punto común que se puede apreciar entre las resistencias **R_{pi}** se mantendrá, y por ahí deberá ser alimentado el sistema para satisfacer los requerimientos del diseño de la Figura 39.

4.1.2.2 Explosores del circuito a implementar. Solo se utilizará un explosor que comprende dos esferas pertenecientes a la primera etapa ($n=1$) en el circuito de generación del impulso de corriente, pues solo ese par resulta necesario. Los demás deberán ser desconectados y retirados.

4.1.2.3 Fuente de alimentación del circuito a implementar. El punto de alimentación del sistema proveniente de la fuente deberá ser movilizado al nodo común de las resistencias **R_{pi}**, nodo donde también se encuentra instalado un terminal de los explosores.

4.1.2.4 Conexión a tierra del circuito a implementar. Como se puede apreciar en la Figura 39, el otro extremo de los capacitores deberá conectarse a tierra, y para ello se recomienda la obtención de un cable de mayor calibre y soporte de corriente que reemplace el sistema de puesta a tierra presente

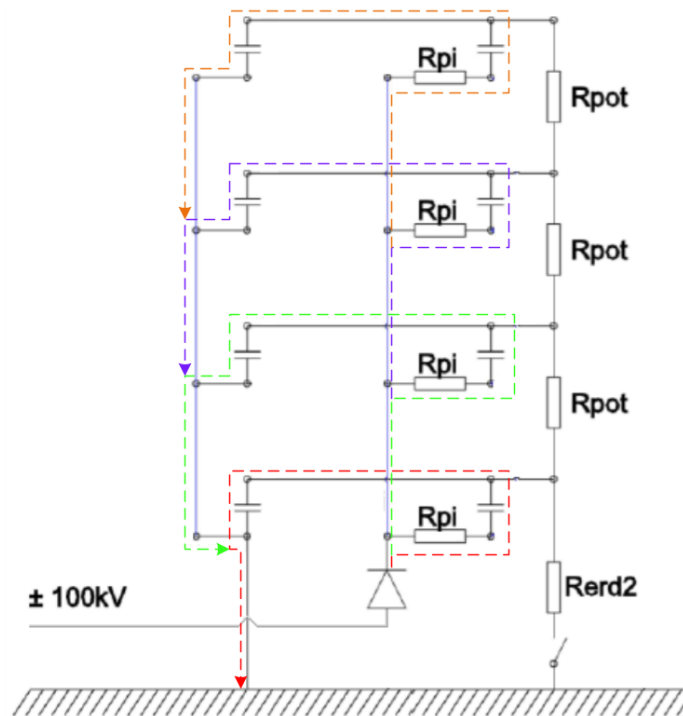
en el GIV, pues este puede resultar insuficiente para manejar los niveles de corriente del GIC debido a su delgada contextura.

La resistencia R_{si} que se encarga de descargar los capacitores a tierra se removerá del circuito del GIC para evitar que afecte a la resistencia calculada del circuito. Se utilizará una pértiga para suplir la función de descargar el terminal en cuestión del capacitor una vez se haya terminado la prueba.

4.1.2.5 Salida hacia objeto de prueba. Finalmente, el impulso de corriente se transportará al objeto de prueba **A**, a través de la inductancia **L** y la resistencia externa necesaria R_{ext} después de activado el par de explosores, y se concluye con la conexión a tierra.

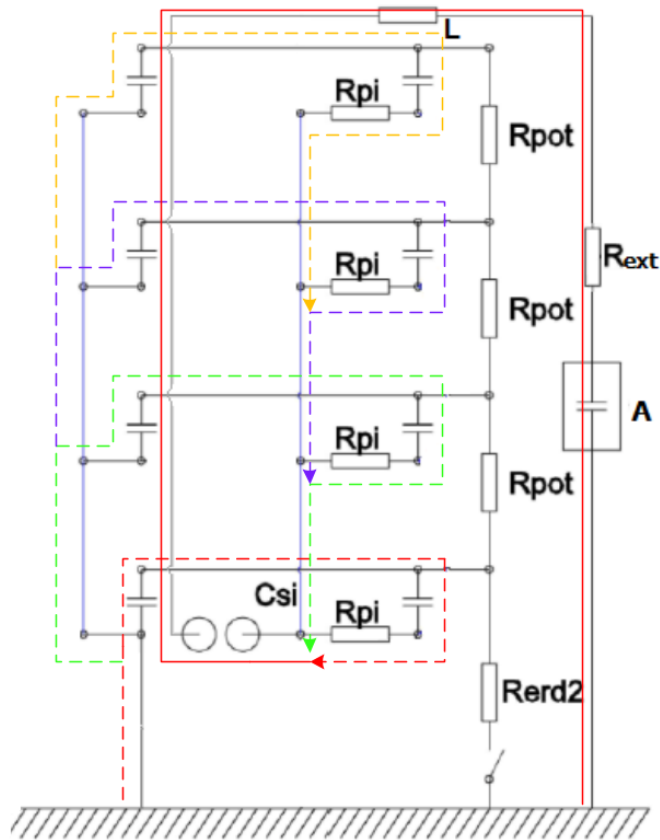
4.1.3 Circuitos de Carga y Descarga.

Figura 40. Fase de carga del circuito GIC a implementar.



La Figura 40 representa el circuito de carga del GIC a implementar, donde se puede apreciar como los capacitores de las 4 etapas se cargan en paralelo, pues el explosor se encuentra en estado abierto para esta fase. Una vez cargados, se produce la ruptura en los explosores y se entra en la fase de descarga del circuito. Esta fase se puede apreciar en la Figura 41 a continuación.

Figura 41. Fase de descarga del GIC a implementar.



Las líneas punteadas representan la descarga de los capacitores a través de las resistencias R_{pi} , en donde cada color es una etapa distinta. La corriente generada en cada una de las 4 etapas tendrá destino al explosor del generador, en donde las corrientes de todas las etapas se sumarán y formarán el impulso de corriente estándar con la amplitud pico deseada, representado en la Figura 41 por la línea entera de color rojo que es la que llega al objeto de prueba **A**, a través de la inductancia **L** y la resistencia externa R_{ext} .

4.1.4 Modificaciones físicas necesarias para la transformación del GIV al GIC.

A continuación, se presentarán los cambios o modificaciones físicas que se requieren en el GIV del LAT para formar el circuito del GIC que se viene proponiendo. Se contará con ayuda de imágenes reales de los elementos del GIV que faciliten la comprensión del tema.

4.1.4.1 Punto común de resistencias.

Figura 43. Configuración actual de resistencias paralelo R_{pi} del GIV.



Fuente: Captura propia.

Figura 42. Conexión a realizar de punto común de resistencias con herraje.



En la Figura 42 se puede apreciar la forma en que se pueden cortocircuitar los terminales de las resistencias para formar el punto común, haciendo uso de herrajes planos de 40 cm disponibles en el LAT, los cuales se pueden apreciar en detalle en la Tabla A.1.1. (Ver Anexo A)

Se deben desconectar y retirar las resistencias serie R_{si} (Color rojo) que se aprecian en la imagen, tal como se explicó previamente.

4.1.4.1 Punto común de capacitancias.

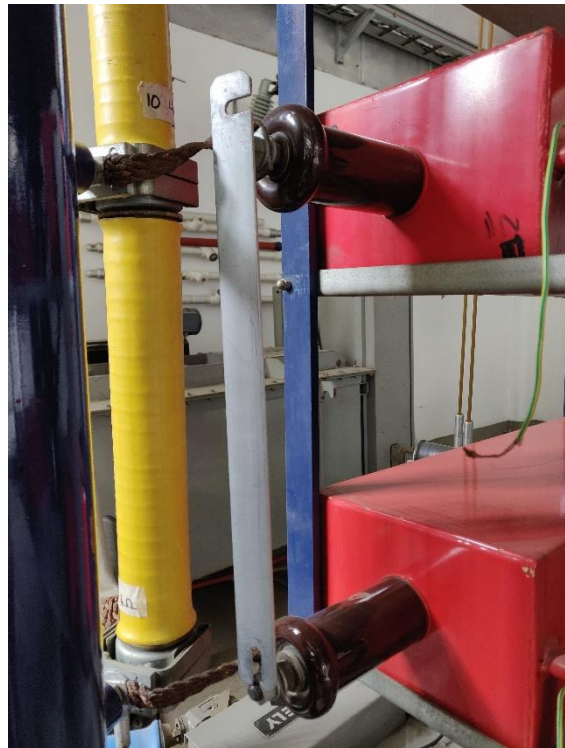
De la misma forma que las resistencias del circuito, es necesario formar un punto común de capacitores que actualmente se realiza mediante resistencias de carga de 4,8 k Ω (Color amarillo), o tubos de aluminio de 36 cm. Esto debe ser reemplazado por herrajes planos de 40 cm directamente en terminales de los capacitores, para luego llevar ese nodo a tierra.

Figura 44. Configuración actual de capacitores del GIV.



Fuente: Captura propia.

Figura 45. Conexión a realizar de punto común de capacitores con herraje.



4.1.4.2 Fuente de alimentación y resistencia R_{si} a tierra.

La entrada al sistema de la fuente de alimentación debe desplazarse al nodo en común de las resistencias previamente mencionado. La nueva entrada de tensión se demuestra en la Figura 47, así como se exhiben las resistencias que se deben retirar del circuito, esto para proveer de mejor claridad el proceso. Entre las resistencias mencionadas a retirar se encuentran las resistencias serie R_{si} que posee el GIV para dar forma al tiempo de frente del impulso de tensión que genera, y la resistencia serie R_{si} que se encarga de descargar un terminal de los capacitores a tierra (la primera de abajo hacia arriba, color rojo). Para descargar dicho terminal se propuso previamente el uso de una pértiga con la que cuenta el LAT de la Universidad del Valle.

Figura 46. Configuración actual de entrada de alimentación del GIV.

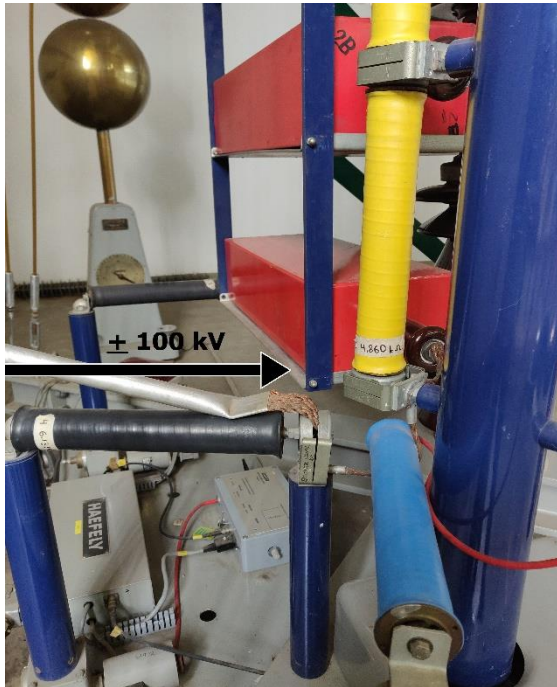


Figura 47. Nueva entrada de fuente de alimentación y resistencias a retirar.



Fuente: Captura y edición propia.

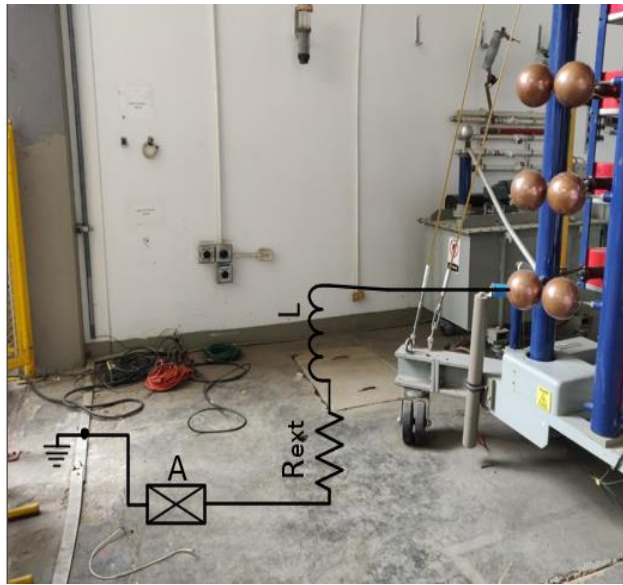
4.1.4.3 Bobina y resistencia externa.

Como se estableció en la Figura 38, después de los explosores vendrán ubicados la bobina **L** y el espacio para la resistencia externa **R_{ext}** que finalmente llevarán el impulso de corriente al objeto de prueba **A**. El explosor tiene como llegada el nodo mostrado en la Figura 49 con un círculo de color rojo, donde se nota una resistencia de carga (Color amarillo), que para la configuración del GIC propuesto debe ser retirada como ya se mencionó previamente. Este nodo sería entonces donde se conectaría la bobina **L** y posteriormente la resistencia externa **R_{ext}** para luego anexar el objeto de prueba y finalizar con la conexión a tierra. Una propuesta para este arreglo se encuentra en la Figura 48 donde se sale del nodo del explosor, y haciendo uso de edición, se logra ubicar los elementos mencionados tomando la decisión más viable después de realizar un análisis de disponibilidad de espacio en la estructura del GIV del LAT, y sus alrededores. Los elementos **R_{ext}**, **L**, y el objeto de prueba **A** pueden ir acomodados sobre stands o mesas disponibles en el LAT

Figura 49. Nodo de llegada del Explosor del GIV.



Figura 48. Esquema de conexión de objeto de prueba propuesto.



Fuente: Captura y edición propia.

4.2 ESPECIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS A OBTENER PARA CONCRETAR LA TRANSFORMACIÓN DEL GIV AL GIC

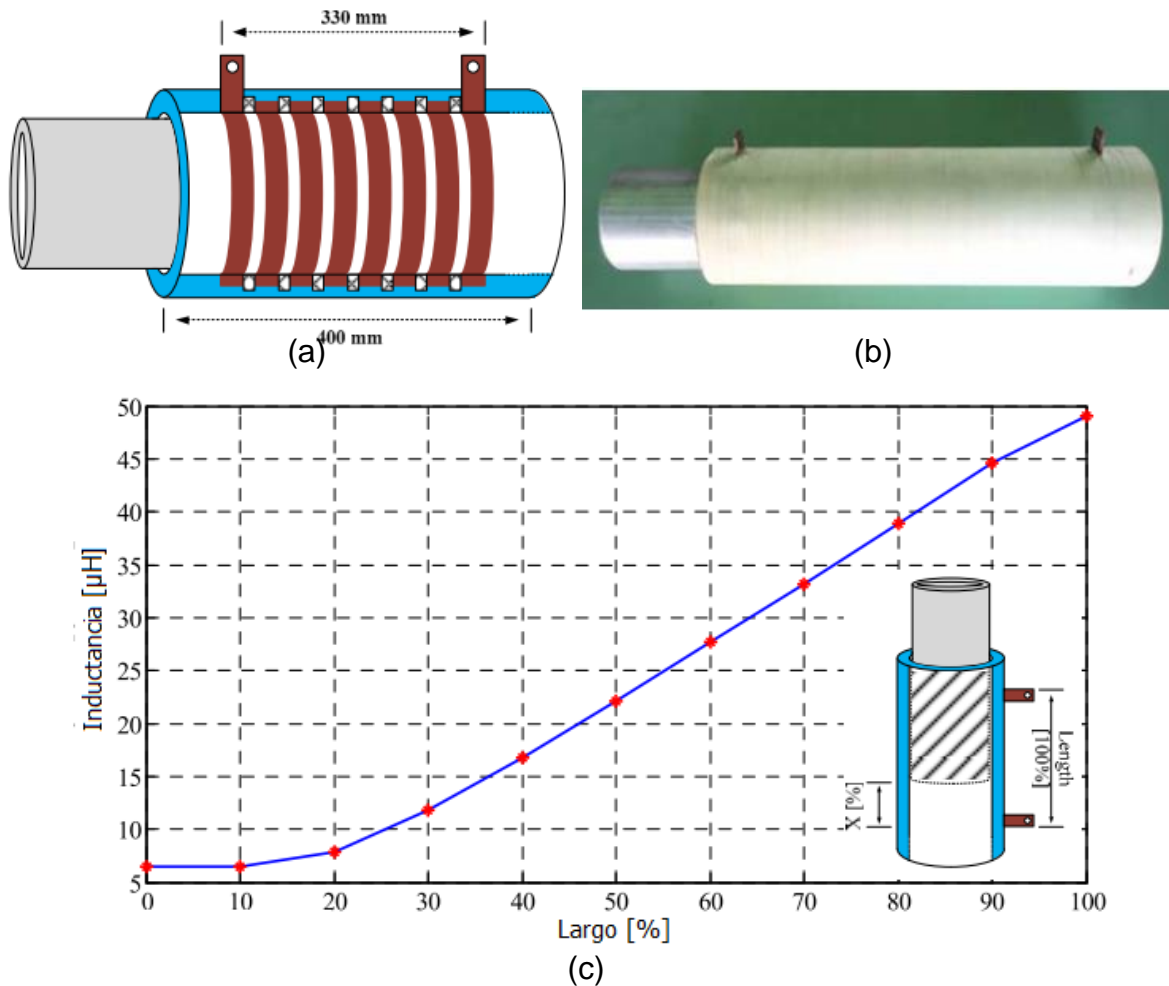
A través de este trabajo de grado se han expuesto ya los elementos necesarios para la conformación de un generador de impulsos de corriente, y se ha mencionado la intención de utilizar aquellos que estén disponibles en el GIV del LAT, buscando la mayor eficiencia en el proceso de obtención del GIC. A continuación, se especificarán aquellos elementos que resultan necesarios para dicha obtención, y que se encuentran ausentes en el LAT.

4.2.1 Bobina o Inductor L del Circuito Generador.

En la práctica real, los circuitos generadores de impulsos de corriente usualmente encuentran mayores restricciones en el ajuste de la capacitancia C por las limitadas configuraciones físicas que posee, y debido a la resistencia interna R del elemento de prueba (DPS), esta variable resulta igualmente complicada de ajustar al buscar la corrección de los tiempos T_1 y T_2 de la onda obtenida, que se ve modificada por la característica no lineal de los descargadores. La inductancia L del circuito resulta entonces la mejor variable para ajustar cuando se desea corregir la forma de onda. Resulta ventajoso entonces poseer un inductor variable

de alta tensión disponible en LAT, por lo cual a continuación se propone un método de construcción de dicho elemento, con el objetivo de reducir el número de inductores necesarios para ajustar una onda de impulso de corriente. [25]

Figura 50. Ejemplo de Inductor variable de núcleo de aire; (a) Modelo esquemático. (b) Inductor físico construido. (c) Resultados de respuesta a la frecuencia del inductor.



Fuente: Tomado y editado de TUETHONG, P. YUTTHAGOWITH, S. et al. (2016). Design and Construction of a Variable Air-Core Inductor for Lightning Impulse Current Test on Surge Arresters.

El diseño de este inductor variable de núcleo de aire se basa en el ajuste del flujo magnético utilizando un tubo de aluminio deslizable como se muestra en la Figura 50 (a). Los valores teóricos de inductancia en μH a obtener se calculan según la ecuación 45. [26]

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot N^2 \cdot r^2}{l} \quad (45)$$

Donde:

- L = Inductividad de la bobina en μH .
- μ_0 = Permeabilidad del núcleo (1 para núcleos de aire).
- N = Número de espiras de la bobina.
- r = Radio de la bobina en metros.
- l = Longitud de la bobina en metros.

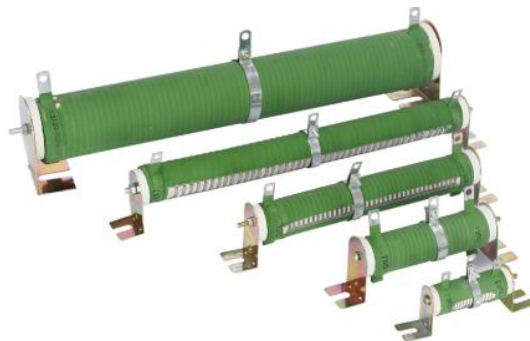
Cuando el tubo de aluminio es totalmente insertado en el núcleo de aire del inductor se obtiene el mínimo valor posible de inductancia, mientras que al ser totalmente retirado se puede lograr el máximo valor de inductancia posible. En la Figura 50 (c) se puede apreciar cómo se comporta la inductancia obtenida a medida que se retira el tubo de aluminio para un inductor en específico [25] cuyas dimensiones físicas y elementos de construcción se exhiben en el Anexo C.

Sin embargo, esta metodología de construcción general revisada se puede aplicar para obtener una bobina con un rango de valores de inductancia que encaje con las necesidades particulares del GIC a implementar en el LAT de la Universidad del Valle. Se recomienda planear la construcción de esta bobina con un valor máximo de $70\mu\text{H}$ que garantiza conservar la relación de la ecuación 26 con respecto a la mínima capacitancia posible de obtener en el GIC a implementar de $1\mu\text{F}$.

4.2.2 Resistencia Externa R_{ext} del Circuito Generador.

En el LAT de la Universidad del Valle se dispone de una resistencia variable que actúa como resistencia externa, construida en trenzado con cable de cobre que permite la modificación de tiempos de frente y cola de los impulsos de voltaje generados por el GIV cuando resulta necesario. Se recomienda obtener una resistencia variable para alta potencia para prevenir daños en la resistencia actual que pueda sufrir debido a los altos niveles de corriente que circularán por el GIC.

Figura 51. Resistencias variables de alta potencia 10W~10kW



4.2.3 Bobina de Rogowski para medición del impulso

Figura 52. Bobinas de Rogowski comerciales tipo flexibles, incluye integrador, 50 kA.



Resulta necesario adquirir un kit de bobinas de Rogowski, más integrador, capaz de registrar la mayor amplitud del impulso de corriente a generar y emitir una señal de 5 A que pueda ser recibida por un medidor de potencia u osciloscopio. Las bobinas de Rogowski del tipo flexible resultan convenientes debido a su maleabilidad y facilidad de instalación en todo tipo de espacios de trabajo.

4.3 METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DEL IMPULSO DE CORRIENTE ESTÁNDAR EN EL GIC A IMPLEMENTAR

Según la configuración propuesta para el GIC estudiada, es posible comprender que se está tomando ventaja de las conexiones por etapas del GIV actual para construir ramas de capacitores en serie con resistencias las cuales funcionarán en paralelo, por lo que el valor equivalente de **R** y **C** del circuito elemental de una etapa se puede estimar al aplicar las ecuaciones de equivalencias básicas:

$$\frac{1}{R_{eqv}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (46) \quad C_{eqv} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (47)$$

Teniendo en cuenta que los valores de resistencias y capacitores de una etapa siempre deberán ser iguales a los de las demás etapas, resulta sencillo conocer la disponibilidad de las magnitudes equivalentes de estos elementos, de los cuales

dependerán directamente los tiempos de frente y cola T_1 y T_2 de la onda a obtener. Estos valores se exhiben en la Tabla C.1.1 . Aplicando la teoría de determinación de parámetros del circuito estudiada en el Capítulo 3, se sabe que existen unas relaciones entre parámetros que garantizan un impulso de corriente estándar de $8/20 \mu s$, pero en la realidad las magnitudes disponibles de los componentes no son infinitos como si pasa en el software de simulación, por lo que habrá que buscar la configuración **RLC** que más se ajuste a los valores que sugiere la teoría, pero con las restricciones que la realidad impone:

- El objeto bajo prueba, el cual según el enfoque de este trabajo de grado es un DPS, posee un valor propio de resistencia y/o capacitancia que afecta directamente el circuito de generación, por lo que habrá que corregir los tiempos de la onda de corriente obtenida mediante la modificación de los parámetros del GIC, apoyándose con la teoría estudiada en el Capítulo 3.
- Las magnitudes de los elementos **RLC** son limitados y deben aprovecharse las configuraciones en paralelo de las etapas necesarias para alcanzar las magnitudes requeridas que permitan la corrección de los tiempos T_1 y T_2 al aplicar la onda a un objeto de prueba, manteniendo el valor pico de corriente requerido.

La resistencia externa R_{ext} entra entonces a suplir la resistencia que pueda faltar para corregir de manera satisfactoria los tiempos T_1 y T_2 , o puede llegar a asumir ella sola toda la resistencia necesaria del circuito, permitiendo así desconectar y retirar las resistencias R_{Si} o R_{Pi} del GIV.

4.3.1 Ejemplo de Obtención de Impulso Estándar

En la realidad resulta imposible conocer la resistencia que el DPS añadirá al sistema de generación de impulsos de corriente, debido a la característica no lineal que posee, por lo que la metodología para aplicar un impulso de corriente estándar debe ser:

1. Configurar el GIC para que genere un impulso de corriente estándar de $8/20 \mu s$ en condición de corto circuito.
2. Conectar el objeto bajo prueba, aplicar un impulso con una amplitud menor al 50% de I_n para observar la onda obtenida y analizar la modificación realizada a los tiempos T_1 y T_2 y al pico de corriente.
3. Aplicando la teoría estudiada, y teniendo en cuenta los valores disponibles de los elementos **RLC**, corregir los tiempos para que cumplan con las tolerancias especificadas por la norma.

Figura 53. Impulso de corriente obtenido en corto circuito. (a) Circuito GIC representativo a la realidad simulado en PSpice. (b). Onda de corriente 8/20 μ s obtenida.

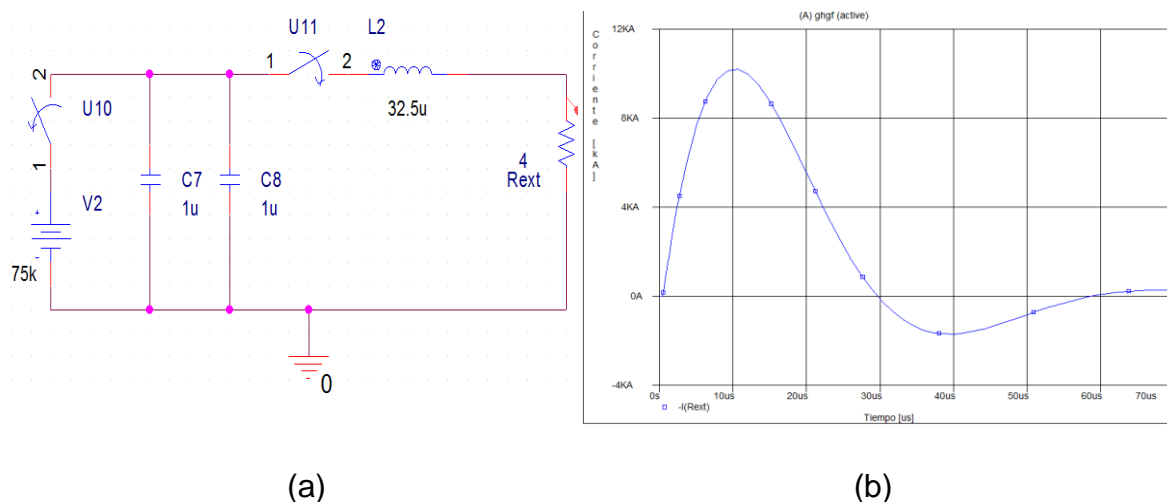


Tabla 19. Resultados de onda obtenida en condición de corto circuito.

Resultados Onda Simulada								
Uo (kV)	C (μ F)	L (μ H)	R _{ext} (Ω)	T1 (μ s)	T2 (μ s)	I _{maxT} (kA)	I _{maxR} (kA)	I _{min} (kA)
75,00	2	32,5	4	7,48	20,67	10,00	10,19	1,70

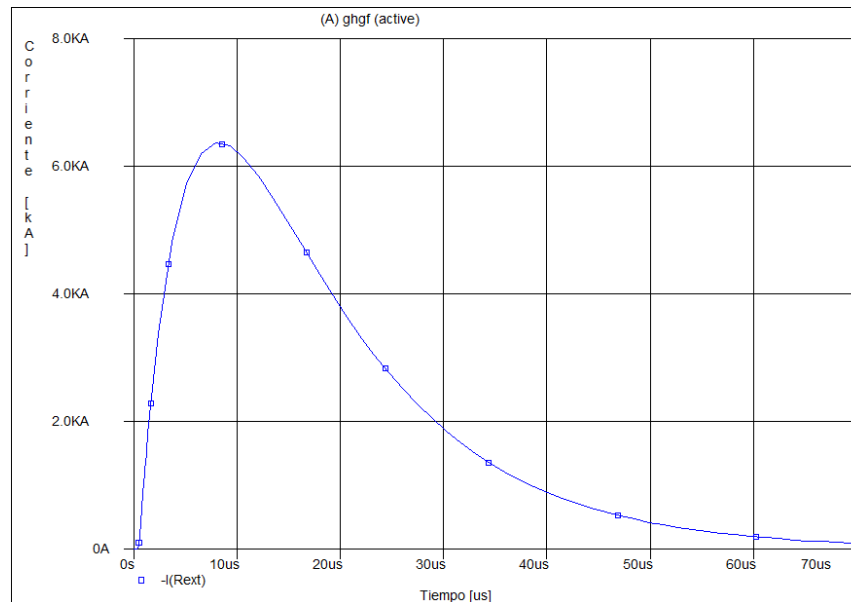
Se obtiene una onda de impulso de corriente estándar de 10,19 kA de amplitud en estado de corto circuito. Se decide utilizar la resistencia externa R_{ext} como resistencia equivalente del circuito, prescindiendo así de las R_{pi} del GIV. A continuación, se conecta el objeto bajo prueba al circuito (DPS) y se obtiene la onda expuesta en la Figura 54, donde se presenta una reducción del tiempo de frente y un aumento del tiempo de cola, causando que ambos queden por fuera de las tolerancias. Se presenta igualmente, tal como se esperaba al aumentar la resistencia del circuito, una reducción en el valor pico de corriente. Estos valores obtenidos se exponen en la Tabla 20.

Se procede entonces a tomar decisiones para corregir satisfactoriamente los tiempos.

- Es claro que el aumento de resistencia por parte del DPS es el causante de la disminución de los picos de amplitud de la onda (ambas polaridades) y de la reducción del tiempo T_1 de la onda, por lo que se procede a retirar la resistencia externa R_{ext} para intentar retornar al valor de resistencia que se encontraba en condición de corto circuito)

- Cómo no es posible retornar completamente al valor previo de resistencia, ya que el valor de la agregada por el DPS es más grande, y se sabe que la capacitancia **C** debe mantenerse estable mientras sea posible, pues su variación es más complicada, se decide compensar el exceso de resistencia con el aumento de la inductancia **L** para aumentar de nuevo el tiempo **T₁**, teniendo en cuenta no aumentar mucho el tiempo **T₂** que también se ve afectado por el aumento de la inductancia.

Figura 54. Onda alterada obtenida al conectar el objeto bajo prueba



Se procede a retirar la resistencia externa como se mencionó, y aprovechando la característica variable del inductor que se propuso construir para posteriormente utilizarlo en el GIC a implementar, se varía su magnitud subiendo hasta el valor de **35 μH**. La onda de impulso de corriente obtenida se expone en la Figura 55 la cual demuestra una corrección considerable del tiempo de frente **T₁** que resultó ser el parámetro más afectado con la conexión del DPS como objeto bajo prueba. Se realiza la comprobación de tiempos y valores pico y se anexan en la Tabla 20.

Los tiempos fueron corregidos satisfactoriamente, sin embargo, el pico de amplitud permanece disminuido con respecto al original en estado de corto circuito (**10,19 kA**), por lo que, aplicando la teoría estudiada, se procede a elevar la magnitud de tensión de entrada al sistema para elevar el valor pico de corriente, sin afectar los tiempos que ya han sido corregidos. Se eleva la tensión hasta **85 kV**, y los resultados obtenidos se agregan a la Tabla 20 a continuación.

Figura 55. Onda corregida mediante la modificación de parámetros R y L .

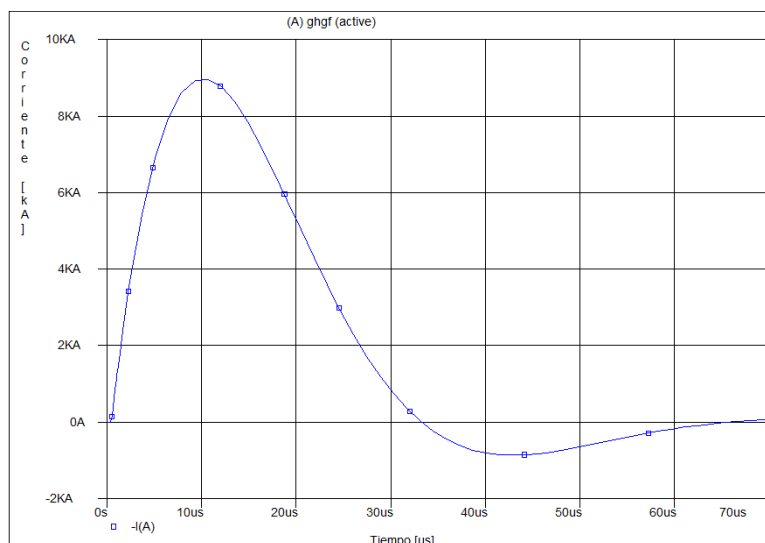
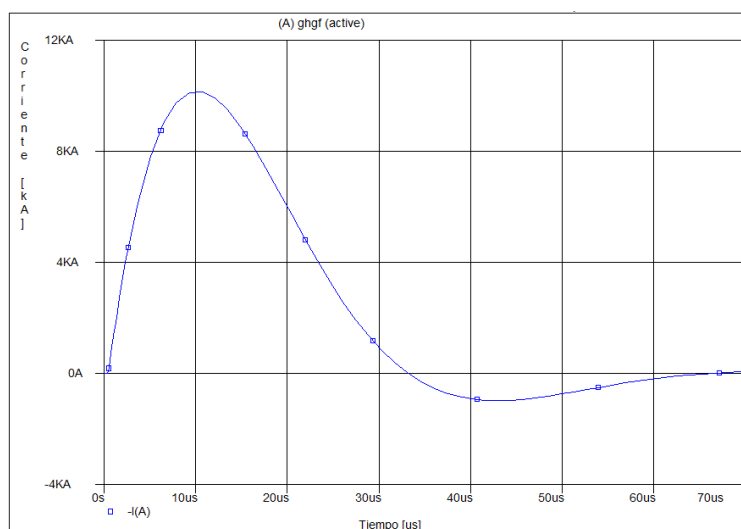


Tabla 20. Resultados de las ondas obtenidas al conectar el DPS, al corregir con variación de R y L , y al aumentar la tensión de entrada.

Resultados Ondas Simulada								
Uo (kV)	C (μ F)	L (μ H)	R _{ext} (Ω)	R _{DPS}	T1 (μ s)	T2 (μ s)	I _{maxR} (kA)	I _{min} (kA)
75	2	32,5	4	5	5.43	22.6	6,37	0
75	2	35	0	5	7.31	21.54	8,96	0,87
85	2	35	0	5	7.31	21.54	10,16	0,98

Figura 56. Onda corregida con aumento de tensión de entrada al sistema.



Se logró de esta manera corregir la onda de impulso de corriente 8/20 μ s otorgada por el GIC simulado al conectarse el DPS como objeto bajo prueba, utilizando los recursos teóricos enseñados en este trabajo de grado sobre la variación de parámetros del circuito.

4.4 LIMITES OPERATIVOS DEL GIC A IMPLEMENTAR

En base a la teoría estudiada a través de este trabajo de grado, se procede a describir los límites operativos del generador de impulsos de corriente propuesto, dando respuesta al último objetivo específico establecido para el desarrollo de este proyecto. Los máximos valores de cada variable dependerán de la disponibilidad de componentes en el Generador de Impulsos de Tensión (GIV) del Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle, el cual será la base para implementar el Generador de Impulsos de Corriente (GIC) proyectado.

La máxima tensión de alimentación será la misma disponible para el GIV del LAT, la cual es de 100 kV, los cuales pueden ser soportados por cada etapa gracias a la distribución actual de dos capacitores por etapa, donde cada uno puede soportar 50 kV.

La máxima capacitancia equivalente se obtendrá al utilizar las 11 etapas disponibles en el GIV, cada una con una capacitancia de 1 μ F, para un total de 11 μ F

La máxima amplitud de corriente que teóricamente es posible generar, se puede calcular haciendo uso de la expresión 31 revisada en el capítulo 2 de este trabajo de grado, la cual es una modificación de la expresión 27, alteración que surge al proponer la utilización de un valor distinto de resistencia **R** del circuito generador al que se propone en la expresión 24. Lo anterior con el objetivo de corregir el sobrepaso por debajo de cero que se presentaba.

$$I_m = \frac{V \cdot C}{15} \quad (31) \quad I_m = \frac{100 \cdot 11}{15} = 73,4 \text{ kA}$$

Los capacitores almacenarán la máxima energía cuando sean alimentados por la máxima tensión de alimentación ya repasada, la cual resulta ser de 5 kJ por etapa, energía para la cual están diseñados soportar. Así que, en teoría, es posible generar esta amplitud de corriente mediante la utilización de todas las etapas del GIV.

La máxima inductancia equivalente dependerá de la creación de la bobina sugerida en el subcapítulo 4.2.1. Sin embargo, teniendo en cuenta la expresión 26 que explicita la relación entre la capacitancia e inductancia del circuito para mantener una forma de onda 8/20 μ s, se puede derivar el máximo valor de inductancia, que resulta necesario cuando se tiene el mínimo valor de capacitancia en el circuito, el cual resulta ser de 1 μ F que representa el uso de una etapa.

$$L \cdot C = 65 \quad (26) \quad L_{\max} = \frac{C_{\min}}{65} = 65 \mu H \approx 70 \mu H$$

Se recomienda entonces la creación de una bobina de máximo valor de inductancia de 70 μ H.

Tabla 21. Descripción de los límites de operación del GIC a implementar en el LAT.

Límites operativos del GIC a implementar		
Máxima Amplitud de Corriente Generada	73,4	kA
Máxima Tensión de Alimentación	100	kV
Forma de Onda de Acuerdo con la Norma IEC	8/20	μ s
Máxima Magnitud de Inductancia Equivalente	70	μ H
Máxima Magnitud de Capacitancia Equivalente	11	μ F
Máxima Magnitud de Resistencia Equivalente	68	Ω
Máxima Magnitud de Resistencia Equivalente (R_{ext})	*Según se adquiera	Ω
Mínima Magnitud de Inductancia Equivalente	*Según se elabore	μ H
Mínima Magnitud de Capacitancia Equivalente	1	μ F
Mínima Magnitud de Resistencia Equivalente	1,36	Ω
Mínima Magnitud de Resistencia Equivalente (R_{ext})	*Según se adquiera	Ω
Máximo Número de Etapas	11	-
Energía Almacenada a Máxima Tensión de Alimentación	55	kJ

5. CONCLUSIONES

- Mediante la satisfactoria simulación computacional realizada del GIC, se propuso una metodología para la obtención de un nuevo valor de R del circuito equivalente que es capaz de corregir el sobrepaso de I_{min} obtenido al utilizar el valor de resistencia equivalente sugerido por la ecuación 24.
- La respuesta sub-amortiguada de la onda a obtener con el GIC se perfiló como la mejor opción entre las posibles, debido a la posibilidad de obtener mayores niveles pico de corriente, siendo imposible obtener una respuesta críticamente amortiguada que cumpla con las tolerancias de la *IEEE*.
- Se llevó a cabo una apropiación asertiva sobre el funcionamiento de los DPS y su normatividad vigente, que concluyó en la realización de un modelo en el software ATP que replica correctamente el desempeño de un descargador en funcionamiento.
- Se establecieron las conexiones necesarias, modificaciones físicas, elementos disponibles y por obtener del GIV del LAT necesarios para concretar la transformación del mismo en un GIC.
- Por lo menos para el caso de un DPS como objeto de prueba, resulta preferible utilizar solo una resistencia externa para suplir la resistencia equivalente del GIC, pues las equivalencias de resistencias logradas con las R_{pi} y R_{si} del GIV superan siempre el valor necesitado para generar la onda.

TRABAJOS FUTUROS

Llevar a cabo la transformación del Generador de Impulsos de Tensión de 1100 kV del LAT de la Universidad del Valle en un Generador de Impulsos de Corriente capaz de generar una onda que cumpla con las tolerancias de la *IEEE*, teniendo en cuenta la teoría estudiada y procedimientos propuestos en este trabajo de grado.

Se propone crear un inductor variable como se expuso en el subcapítulo 4.2.1, que permita a la inductancia ser la variable más sencilla de modificar a la hora de necesitar correcciones en las ondas de corriente generadas por el GIC, al conectar el objeto de prueba.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Jaime and C. Ramíre, "Desarrollo de una norma de pruebas en alta tensión basada en el generador de impulsos de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador," 2009.
- [2] IEEE Power and Energy Society, *IEEE Standard for High- Voltage Testing Techniques IEEE Power and Energy Society*, vol. 13, no. May. 2013.
- [3] V. K. Verma, "Practical Simulation and Modelling of Lightning Impulse Voltage Generator using Marx Circuit," no. November, pp. 9–11, 2014.
- [4] R. J. Lucas, "High Voltage Surge Generators," *High Volt. Eng.*, pp. 132–147, 2001.
- [5] S. Nishat Mariya Sardar Ali, "Performance of a Multi-Stage Impulse Generator," *Int. J. Ethics Eng. Manag. Educ. Website www.ijeee.in*, vol. 2, no. 2, pp. 2348–4748, 2015.
- [6] A. F. Silva Imbachi, "Diseño del Montaje de un Generador de Impulso de 1100 kV," 2015.
- [7] F. R. Campos, F. Amortegui, F. Bojaca, and C. A. Gomez, "Construcción de un generador de impulsos de corriente para ensayos de pararrayos y del sistema asociado de medida," *Ing. e Investig.*, pp. 30–39, 1985.
- [8] R. Bosch and J. Sayols, "Posada en Funcionament D'un Generador D'Impulsos de Corrent de 45 ka, 40 kJ," pp. 1–69, 1997.
- [9] K. Schon, *High Impulse Voltage and Current Measurement Techniques*. 2013.
- [10] F. V Topalis, I. A. Stathopoulos, N. LEONTIDES, and I. . GONOS, "Analysis and design of an impulse current generator."
- [11] N. H. Halim, A. Azmi, Y. Yahya, F. Abdullah, M. Othman, and M. S. Laili, "Development of a small scale standard lightning impulse current generator," *2011 5th Int. Power Eng. Optim. Conf. PEOCO 2011 - Progr. Abstr.*, no. June, pp. 426–431, 2011.
- [12] J. Hyuk *et al.*, "Simulation and Development of Rogowski Coil for Lightning Current Measurement," *J. Electr. Eng. Technol.*, no. 0123456789, 2019.
- [13] G. A. Rodriguez Salinas, "Protección Contra Sobretensiones Impulsionales en Sistemas de Alta Tensión," no. 505, pp. 10–12, 2006.
- [14] M. S. Tenorio, "Cálculos Para La Selección Del Pararrayos," *Soter. Parcial la Línea Eléctrica DC 132 kV "Casillas - Puente Nuevo" y "Lancha - Rivero."*
- [15] L. Cardona Correa, "El Pararrayos (Dps) Como Elemento De Protección Frente a Sobrevoltajes," *Univ. Nac.*, pp. 68–78.
- [16] J. A. Martinez-Velasco, *Power System Transients Parameter Determination*. 2010.
- [17] IEC, *INTERNATIONAL STANDARD IEC 60099-4. Surge Arresters - Part 4: Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c systems*. 2014.
- [18] NTC, "NTC 4389- Descargadores de Sobretensiones (Pararrayos) de Óxido Metálico sin Espaciadores (gaps) para Sistemas de Corriente Alterna," 2005.
- [19] IEEE, "Modeling of Metal Oxide Surge Arresters," vol. 7, no. 1, pp. 302–309,

- 1992.
- [20] F. Fernández and R. Díaz, "Metal-oxide surge arrester model for fast transient simulations," pp. 0–4.
 - [21] J. A. Martinez and D. W. Durbak, "Parameter Determination for Modeling Systems Transients — Part V: Surge Arresters," vol. 20, no. 3, pp. 2073–2078, 2005.
 - [22] D. W. Durbak, "Zinc-oxide Arrester Model For Fast Surges," *EMTP Newsletter*, Vol. 5 No. 1, 1985.
 - [23] ABB, "Zinc-Oxide Surge Arrester PEXLIM P Guaranteed protective data." pp. 1–7, 2007.
 - [24] R. Díaz, F. Fernández, and J. Silva, "Simulation and tests on surge arresters in high-voltage laboratory."
 - [25] P. Tuethong, P. Yutthagowith, and S. Maneerot, "Design and Construction of A Variable Air-Core Inductor for Lightning Impulse Current Test on Surge Arresters," *33rd Int. Conf. Light. Prot.*, pp. 1–4, 2016.
 - [26] B. Xiang, H. Meng, Z. Yin, and S. Hao, "Analysis and Application of Solenoid Inductor," *Proc. 2014 3rd Asia-Pacific Conf. Antennas Propag.*, pp. 1300–1302, 2014.

ANEXO A

A.1 Elementos del generador de impulsos de voltaje del LAT de la Universidad de Valle mencionados en el trabajo de grado.

Tabla A.1.1. Descripción de elementos disponibles en el GIV del LAT de la Universidad del Valle.







	<p>Resistencias Serie o de Frente ($15\ \Omega$)</p> <p>26 Unidades Color Rojo</p>		<p>Resistencias de Carga ($4,8\ \text{k}\Omega$)</p> <p>10 Unidades Color Amarillo</p>
	<p>Resistencias paralelo o de cola ($68\ \Omega$)</p> <p>26 Unidades Color Azul</p>		<p>Resistencias equipotenciales ($800\ \text{k}\Omega$)</p> <p>10 Unidades Color Verde</p>
	<p>Resistencias de descarga ($6\ \text{k}\Omega$)</p> <p>4 Unidades Color Negro</p>		<p>Capacitores de $50\ \text{kV}$ ($2\ \mu\text{F}$)</p> <p>22 Unidades Color Rojo</p>

Tabla A.1.1 (Continuación)

	<p>Herraje Plano de 40 cm</p> <p>33 Unidades</p>		<p>Juego de 11 Explosores</p> <p>21 Esferas</p> <p>2 de Circuito de Disparo</p>
---	--	--	---

Fuente: Capturas propias.

Tabla A.1.2 Especificaciones técnicas del GIV del LAT.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL GIV SERIE E DEL LAT	
Máximo voltaje de carga	$\sum U = 1100 \text{ kV}$
Número de etapas	$S=11$
Máximo voltaje de carga por etapa	$U_s = 100 \text{ kV}$
Energía almacenada a máxima tensión	$W_s = 5 \text{ kJ}$
Capacitancia por etapa	$C_s = 1 \mu F$
Resistencia serie por etapa	$R_{Si} = 15 \Omega$ (Color rojo)
Resistencia en paralelo por etapa para onda de rayo	$R_{pi} = 68 \Omega$ (Color azul)
Resistencia en paralelo por etapa para onda de maniobra	$R_{pi} = R_L = 4.8 \text{ k}\Omega$ (Color amarillo)
Resistencia de carga por etapa	$R_L = 4.8 \text{ k}\Omega$ (Color amarillo)
Resistencia equipotencial	$R_{POT} = 1 \text{ M}\Omega$ (Color verde)
Resistencia de descarga	$R_{erd1} = R_{erd2} = 6 \text{ k}\Omega$ (Color negro)
Altura del generador	$H = 5.2 \text{ m}$
Peso aproximado	$G = 1850 \text{ kg}$

Fuente: Tomado de SILVA, A. Diseño del montaje de un generador de impulso de 1100 kV.

ANEXO B

B.1 Tablas de valores típicos de tensiones residuales máximas en DPS de entre 1.5 kA y 10 kA.

Tabla B.1.1. Tensiones residuales para descargadores de sobretensiones de 20 000 A y 10 000 A. Valores presentados a la tensión nominal.

Tensión nominal U_r (valor eficaz en kV)	20 000 A kV (pico)/ U_r			10 000 A kV (pico)/ U_r		
	Frente escarpado ^a	Tipo rayo ^b	Tipo maniobra ^c	Frente escarpado ^a	Tipo rayo ^b	Tipo maniobra ^c
3 - 29				2,6 - 4,0	2,3 - 3,6	2,0 - 2,9
30 - 132	2,6 - 3,1	2,3 - 2,8	2,0 - 2,3	2,6 - 3,7	2,3 - 3,3	2,0 - 2,6
144 - 342	2,6 - 3,1	2,3 - 2,8	2,0 - 2,3	2,6 - 3,7	2,3 - 3,3	2,0 - 2,6
360 - 756	2,6 - 3,1	2,3 - 2,8	2,0 - 2,3	2,6 - 3,1	2,3 - 2,8	2,0 - 2,3
NOTA La Tabla presenta el intervalo de tensiones residuales máximas disponibles normalmente. Los valores bajos se refieren normalmente a descargadores con una clase de descarga de línea alta y viceversa.						
^a Ensayo de tensión residual por impulso de corriente de frente escarpado (véase el numeral 8.3.1).						
^b Nivel de protección de impulso tipo rayo (véase el numeral 8.3.2).						
^c Nivel de protección de impulso tipo maniobra (véase el numeral 8.3.3).						

Fuente: Tomado de IEC. (2014). IEC 60099-4. Surge Arresters - Part 4: Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c systems.

Tabla B.1.2. Tensiones residuales para descargadores de 5 000 A, 2 500 A y 1 500 A. Valores presentados a la tensión nominal.

Tensión nominal U_r (valor eficaz en kV)	5 000 A kV (pico)/ U_r		2 500 A kV (pico)/ U_r		1 500 A kV (pico)/ U_r	
	Frente escarpado ^a	Tipo rayo ^b	Frente escarpado ^a	Tipo rayo ^b	Frente escarpado ^a	Tipo rayo ^b
0,175 - 2,9	2,7 - 4,0	2,4 - 3,6	3,7 - 5,0	3,3 - 4,5	4,5 - 6,7	4,0 - 6,0
3 - 29	2,7 - 4,0	2,4 - 3,6	4,0	3,6		
30 - 132	2,7 - 3,7	2,4 - 3,3	4,0	3,6		
NOTA La Tabla presenta el intervalo de tensiones residuales máximas disponibles normalmente.						
^a Ensayo de tensión residual por impulso de corriente de frente escarpado, véase el numeral 8.3.1.						
^b Nivel de protección de impulso tipo rayo, véase el numeral 8.3.2.						

Fuente: Tomado de IEC. (2014). IEC 60099-4. Surge Arresters - Part 4: Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c systems.

ANEXO C

C.1 Tablas de especificaciones de los componentes del GIC a implementar.

Tabla C.1.1 Magnitudes disponibles de R y C equivalentes para el GIC.

Magnitudes disponibles de R y C equivalentes para el GIC			
Número de etapas	Resistencia equivalente R		Capacitancia equivalente C
	Usando R_{pi}	Usando R_{si}	
n	[Ω]		[μF]
1	68,00	15,00	1
2	34,00	7,50	2
3	22,67	5,00	3
4	17,00	3,75	4
5	13,60	3,00	5
6	11,33	2,50	6
7	9,71	2,14	7
8	8,50	1,88	8
9	7,56	1,67	9
10	6,80	1,50	10
11	6,18	1,36	11

Tabla C.1.2. Dimensiones del Inductor elaborado en el ejemplo de la Figura 50.

Dimensiones del Inductor Ejemplo de la Figura 50		
Dimensión	Magnitud	Variable
Tipo de alambre de cobre	2x5	mm ²
Distancia entre dos vueltas del devanado	2	mm
Diámetro interno del devanado	102,3	mm
Diámetro externo del devanado	132	mm
Diámetro interno del tubo de aluminio	95,6	mm
Diámetro externo del tubo de aluminio	101,6	mm
Largo del inductor	330	mm
Número de vueltas	39	Vueltas
Valor de inductancia	6,4 - 50	μH

Fuente: Tomado y editado de TUETHONG, P. YUTTHAGOWITH, S. et al. (2016). Design and Construction of a Variable Air-Core Inductor for Lightning Impulse Current Test on Surge Arresters.